

FH Aachen, Campus Jülich
Fachbereich Energietechnik
Studiengang Physical Engineering

**Automatisierte Einstellung der Elektronenstrahlführung des
2-MeV Elektronenkühlers am COSY-Beschleuniger**

Bachelorarbeit von
Arthur Halama

angefertigt am
Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Kernphysik,
IKP-4, Kernphysikalische Großgeräte

September/2014

Diese Arbeit wurde fachhochschulseitig betreut von:

Herr Prof. F. Hoyler

Innerbetrieblich wurde sie betreut von:

Herr Dr. V. Kamerdzhiev

Diese Arbeit ist von mir selbständig angefertigt und verfasst worden. Es sind keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet worden.

Automatisierte Einstellung der Elektronenstrahl-führung des 2-MeV Elektronenkühlers am COSY-Beschleuniger

Kurzfassung

Das Institut für Kernphysik des Forschungszentrum Jülich führt Grundlagenforschung im Feld der Hadronen-, Teilchen- und Kernphysik durch und betreibt zu diesem Zweck den Beschleunigerring COSY (Cooler Synchrotron) [1]. Der neue 2 MeV Elektronenkühler wurde 2013 in den Beschleuniger integriert und wird derzeit in Betrieb genommen. Er ist in der Lage den Ionenstrahl im gesamten Energiebereich des COSY zu kühlen und soll zusätzlich Erfahrungen für das FAIR-Projekt liefern [2].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vordergründig mit der automatisierten Kompensation eines Störeffektes im Elektronenkühler, der Larmorrotation des Elektronenstrahls [3]. Diese kann die Kühlleistung stark beeinträchtigen und auch zum Strahlverlust im COSY führen. Winkelabweichungen des Elektronenstrahls von longitudinalen Magnetfeldlinien der magnetischen Führung rufen diese Rotation hervor und zeigen sich in Form einer spiralförmigen Bewegung des Strahls. Das bisherige manuelle Verfahren zur Kompensation enthielt Schwächen, die durch die automatisierte Lösung minimiert werden sollen.

Die entwickelte Lösung wird in Form eines Programmes auf einem PC im Kontrollraum des COSY eingesetzt, um in wenigen automatisierten Schritten Larmorradien und ihr Verhalten in Bezug auf Stromänderungen von Korrekturmagneten zu messen. Berechnete ideale Stromwerte dieser Magnete beheben die Winkelabweichung in der Kühlstrecke. Das gegebene mathematische Modell wurde für eine erhöhte Zuverlässigkeit überarbeitet. Weitere Modelle wurden alternativ entwickelt.

Weiter beschäftigt sich die Arbeit im geringeren Detail mit Aspekten der automatisierten Einstellung des Elektronenkühlers. Dazu ermöglicht ein weiteres Programm die Einstellung der Hauptmagnetenströme entsprechend der Elektronenenergie. Zusätzlich wurde ein Programm entwickelt, um Strahlpositionsmonitore des Elektronenkühlers zu charakterisieren. Im Vordergrund standen dabei das zeitliche Verhalten des gemessenen Strahlschwerpunktes und das Streuverhalten der eingehenden Messdaten.

Zusammenfassend liegen insgesamt drei Programme vor, die als Diagnose- und Einstelltools des 2 MeV-Elektronenkühlers Verwendung finden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	3
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
2 Theoretische Grundlagen und Messprinzip des Larmorradius	5
2.1 Teilchenbeschleuniger COSY und Strahleigenschaften	5
2.2 Das Prinzip der Elektronenkühlung und des Kühlers	6
2.2.1 Der 2 MeV Elektronenkühler	7
2.3 Herleitung der Larmorrotation	8
2.4 Messung des Larmorradius	10
2.5 Der Kick eines Elektronenstrahls	13
3 Korrekturrechnung, Optimierung und Alternativen	17
3.1 Ursprünglicher mathematischer Ansatz	17
3.1.1 Schwächen des Verfahrens	20
3.2 Alternative mathematische Ansätze	21
3.2.1 Optimierte lineare Korrekturrechnung	21
3.2.2 Fortgeschrittene lineare Korrekturrechnung	21
3.2.3 Quadratische Korrekturrechnung	22
3.2.4 Bi-quadratischer Lösungsansatz	24
3.2.5 Linearer Näherungsansatz	25
4 Experimentelles und Modellvergleich	29
4.1 Larmorradiusmessungen über ein Feld von EDIP-Kombinationen	29
4.2 Überprüfung des linearen Modells	30
4.2.1 Markante Messdaten aus der Prüfung des linearen Modells	32
4.3 Überprüfung der quadratischen Modelle	33
4.4 Diskussion und Vergleich der Modelle	34

5	Realisation, Automatisierung und Ergebnisse	37
5.1	Automatisierte Kompensation	37
5.2	Realisation der Softwarelösung und Einbettung in die Infrastruktur des COSY	40
5.3	Test und Ergebnis der automatisierten Kompensation	41
5.4	Automatisierte Einstellung der Hauptmagnete nach der Elektronenenergie	44
5.5	Untersuchung des Streuverhaltens der BPM	44
5.5.1	Software zur Messung des BPM-Streuverhaltens	44
5.5.1	Ergebnis der Aufnahme des BPM-Streuverhaltens	45
6	Zusammenfassung und Ausblick	47
6.1	Zusammenfassung	47
6.2	Ausblick	48
6.2.1	Kollektorseitige Larmorrotationskompensation	48
6.2.2	Glättung der magnetischen Übergänge der Strahlführungssektionen	48
6.2.3	Orbiteinstellung der Elektronenstrahlführung mit Response-Matrizen	49
	Danksagung	51
7	Literaturverzeichnis	53
	Anhang	55
	Anhang A	55
	Anhang B	58
	Anhang C	69

Abbildungsverzeichnis

1.1: 3D-Modell des 2 MeV Elektronenkühlers	1
2.1: 3D Modell der Elektronenstrahlführung des 2 MeV Kühlers	6
2.2: Messung des Larmorradius	11
2.3: Messdaten und Fits einer Larmorradiusmessung	12
2.4: XY-Darstellung der Messdaten zur Larmorradiusmessung	12
2.5: Graph des Larmorradius als Funktion der Teilkomponenten	14
2.6: Vektorielle Darstellung des Gesamtkicks, verschiedenen kompensierenden Kicks und einem Restkick	14
3.1: Zweidimensionaler Graph der Larmorradiuskomponente c über EDIP-Ströme	19
3.2: Schnitt der Ebenen, die durch die Verteilung der Radiuskomponenten c und d über Korrekturströme aufgespannt wird	20
3.3: Exemplarische Modellierung der mathematischen Funktion zur Ermittlung der idealen Stromkombination in 3D	22
3.4: Modellierung der quadratischen Larmorradienverteilung über verschiedene EDIP-Kombinationen	23
3.5: Dargestellte bi-quadratische Verteilung der Larmorradien als Funktion der EDIP-Stromkombination	25
3.6: Linearer Trend im Schnitt durch den Nullpunkt ausgehend vom Bezugspunkt	26
3.7: Projektion der Geraden durch den Nullpunkt auf die jeweilige horizontale und vertikale Komponente	27
4.1: Gemessene Radiuskomponente c dargestellt über den vertikalen EDIP-Strom	30
4.2: Ausgewählte Messreihen mit deutlichen Abweichungen	32
4.3: Quadrierte Larmorradien über den vertikalen EDIP-Strom	34
5.1: Flussdiagramm der Larmorradiusmessung	38
5.2: Flussdiagramm eines Kompensationsvorgangs	39
5.3: XY-Darstellung der Larmorradiusmessungen des Kompensationsvorgangs	42
5.4: Resultat des Kompensationsverfahrens „strict“	43
5.5: Gemessenes BPM-Streuverhalten	45
B.1: Gemessene Radiuskomponenten c über EDIP-Ströme	58
B.2: Gemessene Radiuskomponenten d über EDIP-Ströme	59
B.3: Gemessene Larmorradiusverteilung über EDIP-Ströme	60
B.4: Gemessene Radiuskomponente c dargestellt über den vertikalen Strom $I_{EDIP,VER}$	61
B.5: Gemessene Radiuskomponente d über $I_{EDIP,VER}$	61
B.6: Gemessene Radiuskomponente c über $I_{EDIP,HOR}$	62
B.7: Gemessene Radiuskomponente d über $I_{EDIP,HOR}$	65
B.8: Quadrierte Larmorradien dargestellt über den vertikalen Strom $I_{EDIP,VER}$ mit quadratischem Modell	63
B.9: Quadrierte Larmorradius über $I_{EDIP,HOR}$ mit quadratischem Modell	63
B.10: Quadrierte Larmorradien über $I_{EDIP,VER}$ mit bi-quadratischem Modell	64
B.11: Quadrierte Larmorradien über $I_{EDIP,HOR}$ mit bi-quadratischem Modell	64

B.12: Gradienten dS_{ver} und dC_{ver} über den konstanten Strom $I_{EDIP,HOR}$	65
B.13: Gradienten dS_{hor} und dC_{hor} über den konstanten Strom $I_{EDIP,VER}$	65
B.14: Ausgewählte Messreihen mit deutlichen Abweichungen aufgeteilt in die Teile der zusammengesetzten Radiuskomponenten	66
B.15: Gemittelttes Summensignal ausgewählter Messreihen mit Auffälligkeiten	66
B.16: Mittlerer Leckstrom ausgewählter Messreihen	67
B.17: Phasendifferenz zwischen dem Gegenkick und dem gemessenen Restkick über alle Messreihen	67
B.18: Phasendifferenzen zwischen dem Gegenkick und dem gemessenen Restkick über das EDIP-Feld	68
C.1: Hauptfensters des Programms „Larmorkompensation“	69
C.2: Fenster des Strahlpositionsverlaufs mit Messdaten und Fit	70
C.3: Fenster der einzelnen Strahlpositionskoordinaten über den veränderten Hauptsolenoidstrom	71
C.4: Fenster zur Berechnung der idealen EDIP-Kombination	72
C.5: Zusammenfassung der Tabs im Fenster zur automatisierten Larmorrotationskompensation	73
C.6: Reihenfolge der EDIP-Kombinationen in den Variationen Pattern A und B aus den Algorithmen „smart“ und „indiv“	74

Tabellenverzeichnis

3.1: Berechnete Gradienten für die Korrekturrechnung	18
5.1: Ergebnisse des automatisierten Kompensationsvorgangs in der Variante „strict“	42
A.1: Messergebnisse der Larmorradiusmessungen über ein Feld von EDIP-Kombinationen	55

1 Einleitung

Das Institut für Kernphysik (IKP) des Forschungszentrums Jülich betreibt den Teilchenbeschleuniger COSY (Cooler Synchrotron) zur Grundlagenforschung in der Hadronenphysik [1]. Dieser beschleunigt Protonen sowie Deuteronen auf Energien von bis zu 2,88 GeV, die Experimentatoren des IKP und internationalen Kollaborationen zur Verfügung stehen [4]. Die namensgebende Besonderheit besteht in der Ausstattung des Synchrotrons durch die stochastische Kühlung und Elektronenkühlung. 2013 wurde ein zweiter Elektronenkühler für kinetische Energien von Elektronen von 25 keV bis 2 MeV [2] installiert und wird derzeit in Betrieb genommen. Der neue Kühler ist in der Lage, im gesamten Energiebereich des COSY zu kühlen. Zudem ermöglicht er, Erfahrungen für das geplante HESR-Synchrotron des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung zu sammeln. Dieses soll mit einem 8 MeV-Kühler ausgestattet werden.

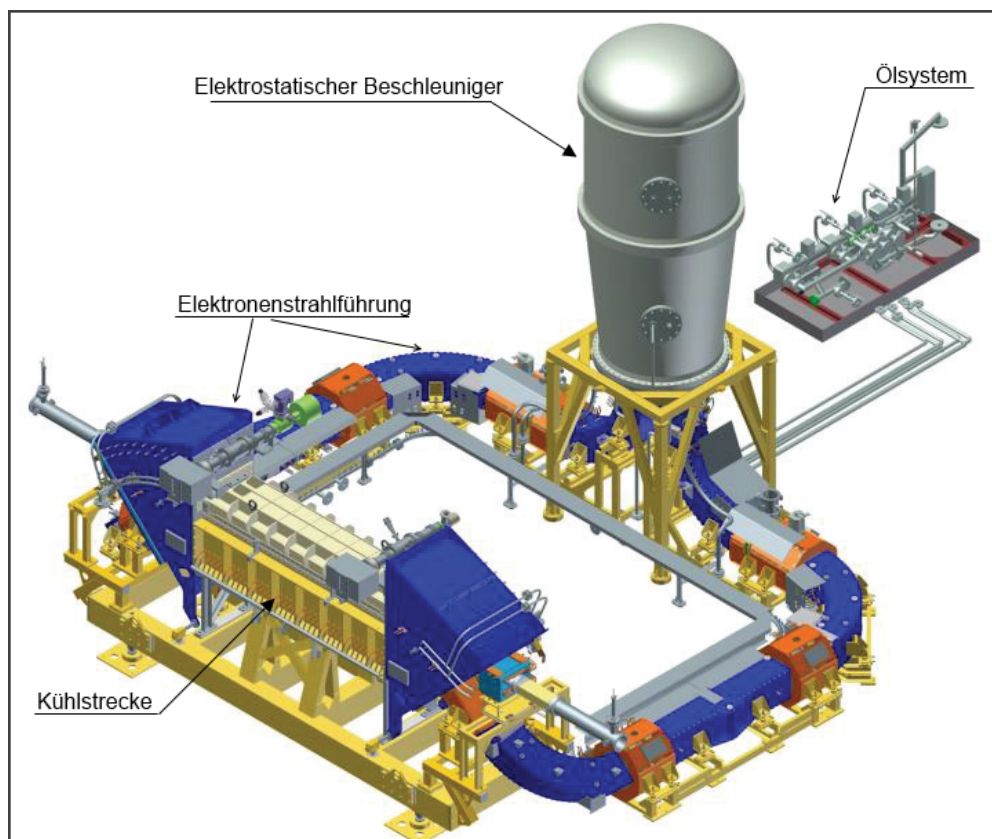


Abb. 1.1: 3D-Modell des 2 MeV Elektronenkühlers. Proceedings of COOL2013, Mürren, Schweiz; TUPM2HA01

Die Geometrie des Elektronenkühlers ist durch die Architektur des Beschleunigerrings, der durch Betonwände abgeschirmt wird, bedingt. Eine Platzierung des elektrostaten Beschleunigers außerhalb der Ringabschirmung ermöglicht zudem eine vereinfachte Wartbarkeit. Der Elektronenstrahl unterliegt einer vollkommenen magnetischen Führung und verlässt damit nie dessen longitudinales Magnetfeld. Unter diesen geometrischen und physikalischen Bedingungen führen Fertigungstoleranzen und ungenaue Einstellungen der magnetischen Führung zu störenden Effekten, die die Kühlleistung beeinträchtigen.

Einer dieser Effekte zeigt sich auch in der Kühlersektion und wurde als Larmorrotation identifiziert [3]. Analog zum Modell der idealen Gase wird die Larmorrotation, durch die erhöhte Geschwindigkeitsverteilung als Aufheizeffekt des Elektronenstrahls betrachtet. Die verwendete manuelle Methode, um das Auftreten dieses Effekts zu minimieren, erwies sich als langwierig und enthielt Quellen für Fehler.

Diese Arbeit dient dem Zweck, diesen Effekt zu beschreiben und die analytische und methodische Herangehensweise zu dokumentieren, mit der die automatisierte Kompensation der Larmorrotation realisiert wurde. Weitere Aspekte der automatisierten Einstellung des Elektronenkühlers werden in einer geringeren Detailtiefe angesprochen.

Für einige Zwecke weist der injizierte und ungekühlte Ionenstrahl des COSY eine ungünstige Strahlqualität auf und unterliegt zusätzlichen Aufheizprozessen, wie dem Auftreffen des Strahls auf interne Targets. Durchgeführte Experimente leiden so unter einer niedrigen Luminosität, einem aufgeweiteten Strahlquerschnitt und einer unscharfen Energieverteilung der Ionen. Um die Ionenstrahlqualität zu verbessern, kann der Strahl durch Elektronenkühlung gekühlt werden [5]. Ein rapider Strahlintensitätsverlust durch interne Targetkollisionen wird so zusätzlich gedämpft.

Für die Elektronenkühlung wird ein kontinuierlicher Elektronenstrahl in den Ionenstrahl eingeleitet. Dieser liegt parallel auf der Bahn des Ionenstrahls und hüllt ihn ein. Die Geschwindigkeit der Elektronen ist dabei identisch mit der mittleren Geschwindigkeit der Ionen. Die Coulombwechselwirkung zwischen heißen Ionen und kühlen Elektronen führt zur Abgabe von Wärmeenergie an den Elektronenstrahl. Dieser Vorgang ist bis zum thermischen Gleichgewicht zwischen Elektronen- und Ionenstrahl möglich. Ein kühler Elektronenstrahl wird für eine möglichst wirksame Kühlung des Ionenstrahls angestrebt.

Ungenauigkeiten und nichtideale Magnetfeldeigenschaften führen zu Winkelabweichungen des Elektronenstrahls von den magnetischen Feldlinien. Diese Abweichung kann als transversale Geschwindigkeitskomponente aufgefasst werden. Geladene Teilchen mit einer Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu den Magnetfeldlinien, werden durch die Lorentzkraft beeinflusst. Im homogenen Magnetfeld zwingt diese Kraft geladene Teilchen im Gleichgewicht mit der Zentrifugalkraft auf eine Kreisbahn. Eine Spiralbewegung der Teilchen entsteht durch die Superposition der Kreisbewegung und der longitudinalen Ausbreitung der Elektronen. Die spiralförmige Bewegung wird als Larmorrotation bezeichnet, deren Radius im Elektronenkühler eine Größe bis zu wenigen Millimetern beträgt. Der Strahl besitzt mit dieser Form eine erhöhte transversale Geschwindigkeitsverteilung, wodurch die Kühlleistung, je nach Ausmaß der Larmorrotation reduziert wird.

Die Anforderung eines automatisierten und überarbeiteten Verfahrens zur Kompensation der Larmorrotation ergab sich durch die Schwächen des vorangegangenen manuellen Kompensationsverfahrens.

1.1 Stand der Technik

Die Problematik, die mit dieser Arbeit behandelt wird, ist ein Resultat der komplexen Geometrie und nicht idealen Bedingungen, denen der Elektronenkühler unterliegt. Fertigungstoleranzen magnetischer Elemente führen in der Praxis zu Abweichungen von der Theorie. Die Reihenschaltung fehlerbehafteter magnetischer Elemente verstärkt die absolute Abweichung zusätzlich. Dies lässt sich nicht durch die einzelne Verschaltung der Elemente mindern, da sie aus technischen Gründen ausgeschlossen ist.

Die Problematik wurde von den Mitarbeitern des Budker Institute of Nuclear Physics (BINP, Novosibirsk) bereits untersucht und behandelt, wodurch die manuelle Lösung zur Kompensation der Larmorrotation entwickelt werden konnte. Diese dient als Grundlage für die Entwicklung einer automatisierten Kompensation. Die Basis des Kompensationsverfahrens bilden die Messungen des Larmorradius und des Zusammenhangs zwischen dem Radius und der Einstellung zweier Korrekturmagnete [6].

Der Larmorradius wird ermittelt, indem eine Änderung der magnetischen Induktion die Larmorspirale staucht und sich ihre Phase am Ende der Kühlstrecke damit linear ändert. Auf einem ortsfesten Strahlpositionsmonitor wird dies als Schwingung der X- und Y-Koordinate gemessen. Die Amplitude dieser Schwingung entspricht dem Larmorradius. Eine detailliertere Beschreibung der Messung des Larmorradius wird im Kapitel 2.4 aufgeführt.

Die erwähnten Korrekturmagnete sind senkrecht zueinander angeordnet, verhältnismäßig kurz und liegen direkt hinter dem elektrostatischen Beschleuniger. Sie können eine Winkeländerung des Elektronenstrahls hervorrufen. Bei geeigneten Strömen kompensiert die erzeugte Winkeländerung die Winkelabweichung in der Kühlstrecke, die für die Larmorrotation verantwortlich ist. Eine Messung des Zusammenhangs zwischen dem Larmorradius und den Strömen der Korrekturmagnete ermöglicht die deterministische Kompensation aufgrund eines mathematischen Modells. Der Zusammenhang wird durch die Linearkombination der einzelnen Korrekturmagneteeinflüsse beschrieben. Ausgehend von einer gewählten Stromkombination als Ausgangspunkt wird nacheinander der jeweilige Einfluss der Korrekturmagnete auf den Larmorradius ermittelt. Mit dem Ausgangspunkt und zwei senkrechten Stromänderungen werden so drei Stromkombinationen in Verbindung mit resultierenden Larmorradien, als Messpunkte in eine Korrekturrechnung übertragen. Das Ergebnis der Korrekturrechnung führt zu einer optimierten Einstellung der Korrekturmagnete zur Kompensation der Larmorrotation.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Mit dieser Arbeit wird eine Lösung für die automatisierte Larmorrotationskompensation angestrebt, da sich das manuelle Kompensationsverfahren als zeitaufwendig und fehleranfällig erweist. Zudem erschweren die modulare Trennung der Arbeitsschritte und die unflexible Korrekturrechnung eine schnelle und sichere Durchführung. Für eine höhere Zuverlässigkeit werden die Korrekturrechnungen überarbeitet. Die Softwarelösung soll einen Platz als Knotenpunkt in der Mess- und Kontrollstruktur des Elektronenkühlers finden. Weitere Programme sollen weitere Aspekte der automatisierten Einstellung des Elektronenkühlers abdecken.

2 Theoretische Grundlagen und Messprinzip des Larmorradius

2.1 Teilchenbeschleuniger COSY und Strahleigenschaften

Teilchenbeschleuniger sind Anlagen zur Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen, deren Strahlen vielfache Verwendungen in der experimentellen Forschung, Medizin und Industrie finden. Elektrische Felder beschleunigen Teilchen, wie Elektronen, Ionen, Moleküle oder auch Antimaterie, je nach Art und Verwendungszweck des Beschleunigers in einem Hochvakuum. Im Gegensatz zu Linearbeschleunigern werden die Teilchen in Ringbeschleunigern mit starken Magnetfeldern durch Umlenkung auf ihrer Bahn gehalten. [7]

Das Institut für Kernphysik des Forschungszentrums Jülich betreibt das Synchrotron COSY. Dieses beschleunigt unpolarisierte und polarisierte Protonen und Deuteronen auf der rennbahnförmigen Strecke von 184 m auf Spitzenenergien von bis zu 2,88 GeV. Der beschleunigte Strahl wird für interne Experimente auf Targets geschossen oder für externe Experimente extrahiert und an entfernteren Messplätzen verwendet. Ziel ist die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hadronenphysik [1]. Der Ionenstrahl des COSY kann als Teilchenpaket (gebuncht), langgezogene Einheit von Teilchen (Barrier-Bucket-Verfahren [8]) oder als DC-Strahl vorliegen.

Teilchenstrahlen weisen eine Verteilung der longitudinalen und transversalen Geschwindigkeit auf. Eine resultierende transversale Impulsunschärfe steht in Verbindung mit der transversalen Emittanz, als Produkt der Querschnittsfläche und der Winkeldivergenz. Die longitudinale Impulsunschärfe zieht den Strahl auseinander. Für eine Interpretation der Experimente im Beschleuniger sind Ereignisse einer guten räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie einer scharf bestimmten Energie des Teilchenstrahls von großem Vorteil. Da die Elektronenkühlung die Emittanz und die longitudinale Impulsunschärfe verringert, dient sie maßgeblich der Verbesserung der Strahlqualität. Des Weiteren kommt es bei der Kollision am internen Target zur Aufheizung des Teilchenstrahls. Die Auswirkungen dieses und weiterer Aufheizeffekte können durch die Elektronenkühlung gedämpft werden.

2.2 Das Prinzip der Elektronenkühlung und des Kühlers

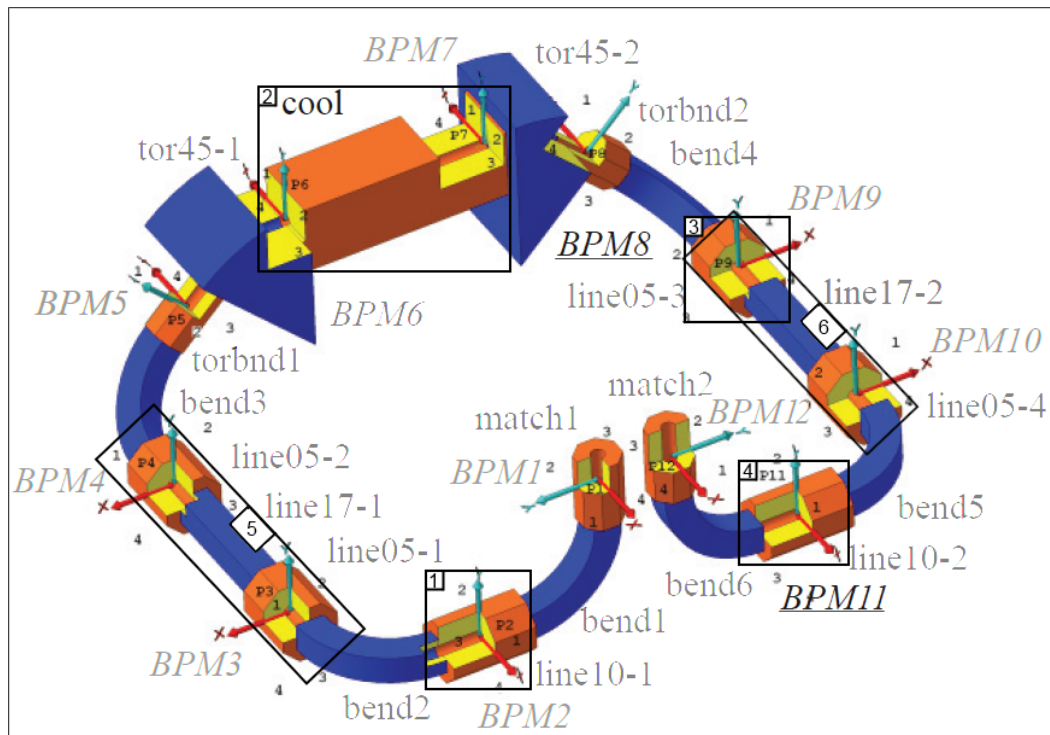


Abb. 2.1: 3D Modell der Elektronenstrahlführung des 2 MeV Kühlers. Proceedings of COOL2013, Mürren, Schweiz; TUPM2HA01. Anordnung der BPM und magnetischer Elemente. 1) Position der EDIP-Korrekturmagnete 2) Kühlstrecke 3) Position des ausgelesenen BPM 8 zur Larmorrotationskompensation 4) Position des BPM für die Larmorrotationskompensation des Kollektors 5,6) Gerade Strahlführungselemente Line17-1, Line17-2 Sektion

Die Betrachtung der Temperatur des Teilchenstrahls analog zur Dynamik von Gasteilchen ermöglicht die Vorstellung eines Temperatúraustausches zwischen zwei Medien. Kühle Elektronen können verwendet werden, um Ionen durch Coulombwechselwirkung Energie zu entziehen [5]. Eine Bedingung dafür ist die gleiche mittlere Geschwindigkeit des Elektronen- und des Ionenstrahls. So entsteht ein bewegtes Bezugssystem in dem man sich mit dem Strahl auf seiner idealen Bahn bewegt. Der Elektronenstrahl umhüllt dabei den Ionenstrahl. Oft wird eine koaxiale Anordnung gewählt, um Auswirkungen der ungleichen radialen Verteilung der longitudinalen Geschwindigkeit des Elektronenstrahls zu reduzieren. Eine Abweichung der Bedingung senkt dabei nicht nur die Kühlleistung, sondern kann die Qualität des Ionenstrahls auch herabsetzen.

Für die Kühlung des Teilchenstrahls ist die Coulombwechselwirkung zwischen den Ionen und den Elektronen verantwortlich. Im bewegten Bezugssystem bewegen sich die Ionen nur entsprechend ihrer thermischen Energie und werden vom kühlen und damit sehr statischen Elektronengas umhüllt. Dabei findet eine Energieabgabe von heißen Ionen an kühle Elektronen durch Coulomb-Kollisionen statt.

Die Kühlleistung auf ein Ion ist von seiner thermischen Energieabhängig und ist für kühle Ionen größer. Entsprechend des hinzugezogenen Analogons der Gasteilchen kann die Wärmeenergie des Teilchenstrahls nur bis zum thermischen Gleichgewicht ausgetauscht werden. Langzeitig betrachtet ist dadurch die theoretische Grenze festgelegt, bis zu der

der Teilchenstrahl gekühlt werden kann. Diese Grenze ist in der Praxis durch Aufheizeffekte, wie intra beam scattering, verschoben. So fällt die Kühlleistung asymptotisch auf null sobald Aufheizeffekte und Kühlkräfte im Gleichgewicht stehen. Für eine möglichst tiefe Kühlung ist eine niedrige Strahltemperatur des Elektronenstrahls selbst wichtig. Diese wird dadurch begünstigt, dass der Strahl stetig erzeugt, kühl verwendet und anschließend rekuperiert wird.

2.2.1 Der 2 MeV Elektronenkühler

Im elektrostatischen Beschleuniger werden Elektronen von der sogenannten Gun durch eine Oxidkathode emittiert und über eine Einheit von 33 Hochspannungssektionen auf eine nominale Maximalenergie von bis zu 2 MeV beschleunigt. Der Designwert für die maximale Stromstärke beträgt 3 A. Die Gun lässt zusätzlich eine Einstellung des Elektronenstrahlprofils zu [9]. Da sich die notwendige elektrische Leistung für die Erzeugung eines solchen Strahls nicht permanent aufbringen ließe, wird der Elektronenstrom im Kollektor rekuperiert [10]. In diesem Prozess liefern elektrostatisch abgebremste Elektronen die Energie zur erneuten Beschleunigung.

Das führende Magnetfeld wird durch Hauptmagnete erzeugt, die von 5 Netzgeräten versorgt werden [11]. Eine Reihe von Korrekturmagneten entlang der Strahlführung dient der Einstellung der Strahlposition. Der beschleunigte Elektronenstrahl verlässt über seine gesamte Bahn nie das longitudinale Magnetfeld. Durch diese Art der Führung kann die Qualität des Elektronenstrahls über die gesamte Strecke beibehalten werden.

In den Biegesektionen werden die Elektronen durch das longitudinale Magnetfeld geführt und zusätzlich durch Dipolmagnete gelenkt. Für diese Führung gilt folgende Betrachtung: Bei Eintritt in eine Biegesektion behalten die Elektronen gemäß ihrer Trägheit zunächst die Flugbahn bei, während die Magnetfeldlinien der Sektion der Biegung folgen. Diese Winkelabweichung des Elektronenstrahls von den Feldlinien führt zu einer erzwungenen Spiralbahn, um mit dieser den magnetischen Feldlinien zu folgen. Die Hauptmagnete sind zu diesem Zweck so konzipiert, dass stets ein ganzzahliges Vielfaches von Larmorlängen in den Sektionen vorliegt [11]. Die Larmorlänge ist die longitudinale Strecke auf der eine Periode der Spiralform vollzogen wird. Unter dieser Bedingung verlässt der Elektronenstrahl die Sektionen stets phasenrichtig und liegt anschließend ohne Winkelabweichung parallel auf den magnetischen Feldlinien der nächsten Sektion. Es ist ebenfalls möglich den Ein- und Austritt des Strahls aus einer Biegesektion durch Übermittlung von transversalen Geschwindigkeitsänderungen (Kicks) zu beschreiben, die sich in der Summe kompensieren. Erwähnte fertigungsbedingte Ungenauigkeiten tragen an den Übergängen der einzelnen Sektionen maßgeblich zur Akkumulation von Kicks bei, die nicht vollständig kompensiert werden konnten. Die Beschreibung eines Kicks wird in Kapitel 2.5 aufgeführt.

2.3 Herleitung der Larmorrotation

Die Kreisbewegung der Larmorrotation entsteht wie die Zyklotronbewegung durch die transversale Geschwindigkeitskomponente des Elektronenstrahls. Durch diesen Anteil der Geschwindigkeit, der senkrecht zu den magnetischen Feldlinien steht, wirkt die Lorentzkraft auf den Strahl. Da damit eine stetige Richtungsänderung verbunden ist, ergibt sich im homogenen Magnetfeld eine Kreisbahn in der transversalen Ebene, in der Lorentzkraft und Zentrifugalkraft der Teilchen im Gleichgewicht stehen.

Auf dieser Grundlage ergeben sich folgende Formeln:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

Die Geschwindigkeit wird in ihre parallelen und senkrechten Anteile entlang der Magnetfeldlinien aufgeteilt.

$$\vec{v} = (0, v_{\perp}) + (v_{\parallel}, 0) \quad (2.2)$$

Damit vereinfacht sich für Elektronen:

$$F_L = e \cdot v_{\perp} \cdot B \quad (2.3)$$

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2.4)$$

$$F_Z = F_L \quad (2.5)$$

$$r_{Larmor} = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} \quad (2.6)$$

$$t_{umlau\!f} = \frac{2\pi \cdot r_{Larmor}}{v_{\perp}} = \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot B} \quad (2.7)$$

$$l_{Larmor} = v_{\parallel} \cdot t_{umlau\!f} = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot B} \quad (2.8)$$

l_{Larmor} ist die Larmorlänge. L_{total} wird als die konstante Strecke eingeführt, auf der der Strahl effektiv durch das Magnetfeld des Hauptsolenoids beeinflusst wird. Das Hauptsolenoid ist das magnetische Element der Kühlstrecke. Damit liegen bei unterschiedlichen magnetischen Induktionen unterschiedlich viele Larmorlängen auf der effektiven Strecke.

$$L_{total}(B_1) = n \cdot l_{Larmor_1} \quad (2.9)$$

$$L_{total}(B_2) = (n + 1) \cdot l_{Larmor_2} \quad (2.10)$$

$$B_2 = B_1 + \Delta B \quad (2.11)$$

ΔB ist die magnetische Induktion, mit der eine Larmorlänge mehr auf der effektiven Länge L_{total} Platz findet.

Für die beiden magnetischen Induktionen ergeben sich damit auch verschiedene Larmorlängen.

$$l_{Larmor}(B_1) = l_1 = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot B_1} \quad (2.12)$$

$$l_{Larmor}(B_2) = l_2 = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot B_2} = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot (B_1 + \Delta B)} \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2}} = \frac{1}{\frac{n}{L_{total}} - \frac{n+1}{L_{total}}} = \frac{1}{\frac{1}{L_{total}}} = L_{total} \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{L_{total}} = \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} = \frac{e \cdot B_1}{2\pi \cdot m_e} - \frac{e \cdot (B_1 + \Delta B)}{2\pi \cdot m_e} = \frac{e \cdot \Delta B}{2\pi \cdot m_e} \quad (2.15)$$

$$L_{total} = \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot \Delta B} \quad (2.16)$$

Für die Aufnahme, um jeweils eine weitere Larmorlänge, ergibt sich eine feste magnetische Induktion.

$$\Delta B = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot L_{total}} \quad (2.17)$$

Zur Vereinfachung dient der lineare Proportionalitätsfaktor A zur Umrechnung des Stromes in die magnetische Induktion.

$$B = I \cdot A \quad (2.18), \quad \Delta B = \Delta I \cdot A \quad (2.19)$$

Da, mit jeder Aufnahme einer weiteren Larmorlänge, eine volle Periode des Strahlschwerpunktes an einem ortsfesten Strahlpositionsmonitor gemessen wird, lässt sich die Frequenz ω_s in rad/Ampere einführen.

$$\omega_s \cdot \Delta I = 2\pi \quad (2.20)$$

Nach ω_s aufgelöst und eingesetzt ergibt sich:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{\Delta I} = \frac{2\pi \cdot e \cdot L_{total} \cdot A}{2\pi \cdot m_e \cdot v_{\parallel}} \quad (2.21)$$

In der Beschleunigerphysik treten relativistische Zustände von Teilchen auf. Dies gilt ausnahmslos ebenso für die Berechnungen im Rahmen der Larmorrotation. Damit ist die Masse der Elektronen $m_e = \gamma \cdot m_{e0}$.

Für einen günstigeren Umgang zur Berechnung der Frequenz eignet sich das Einsetzen der relativistischen Terme wie β , γ und die Elektronenruheenergie. β ist das Verhältnis der Teilchengeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit.

$$\beta = v_{\parallel}/c \quad (2.22)$$

Für den 2 MeV Elektronenkühler ist der Unterschied zwischen Gesamtgeschwindigkeit und longitudinalem Anteil so gering, dass v , die Gesamtgeschwindigkeit eingesetzt werden kann, die sich aus der kinetischen Energie des Elektronenstrahls ergibt. γ ist der Lorentzfaktor, der hier die Massendilatation der Teilchen beschreibt. So vereinfacht sich die Formel zu:

$$\omega_s = \frac{L_{total} \cdot c \cdot A}{E_{e0} \cdot \gamma \cdot \beta} \quad (2.23)$$

Die Ruheenergie wird in dieser Formel in eV angegeben. Für das Hauptsolenoid beträgt der Proportionalitätsfaktor A einen Wert von $6,061 \cdot 10^{-4}$ T/A. Die effektive Länge wird mit der Solenoidlänge von 2,7 Metern angegeben.

2.4 Messung des Larmorradius

Das verwendete Messprinzip für die Ermittlung des Larmorradius nutzt den Einfluss der magnetischen Induktion auf den Elektronenstrahl direkt aus. Der Larmorradius und die Larmorlänge stehen im direkten Zusammenhang mit der magnetischen Induktion. Eine Änderung des Stromes des verantwortlichen Magneten wirkt sich antiproportional auf die Larmorlänge aus (vgl. Gleichung (2.8), (2.18)).

Damit führt dies gleichermaßen zur proportionalen Änderung der Anzahl von Larmorlängen in der Kühlstrecke in Abhängigkeit des Stromes, da folgender Bezug vorliegt. L_{total} ist eine konstante.

$$n = L_{total} / l_{Larmor} \quad (2.24)$$

Mit Zunahme der magnetischen Induktion wird die Larmorlänge kürzer. Dies hat bei konstanter effektiver Länge des Hauptsolenoids eine Zunahme der Anzahl der Larmorlängen zur Folge. Analog ändert sich die Frequenz der Oszillationsbewegung um die Achse. Die Erhöhung des Stromes für eine Zunahme einer ganzen Larmorlänge entspricht einer Phasendifferenz der Spiralforn am Ende der Kühlstrecke von 2π . Dies zeigt sich in Form einer Oszillation mit dem Larmorradius der X- und Y-Koordinate an einem ortsfesten BPM (Strahlpositionsmonitor).

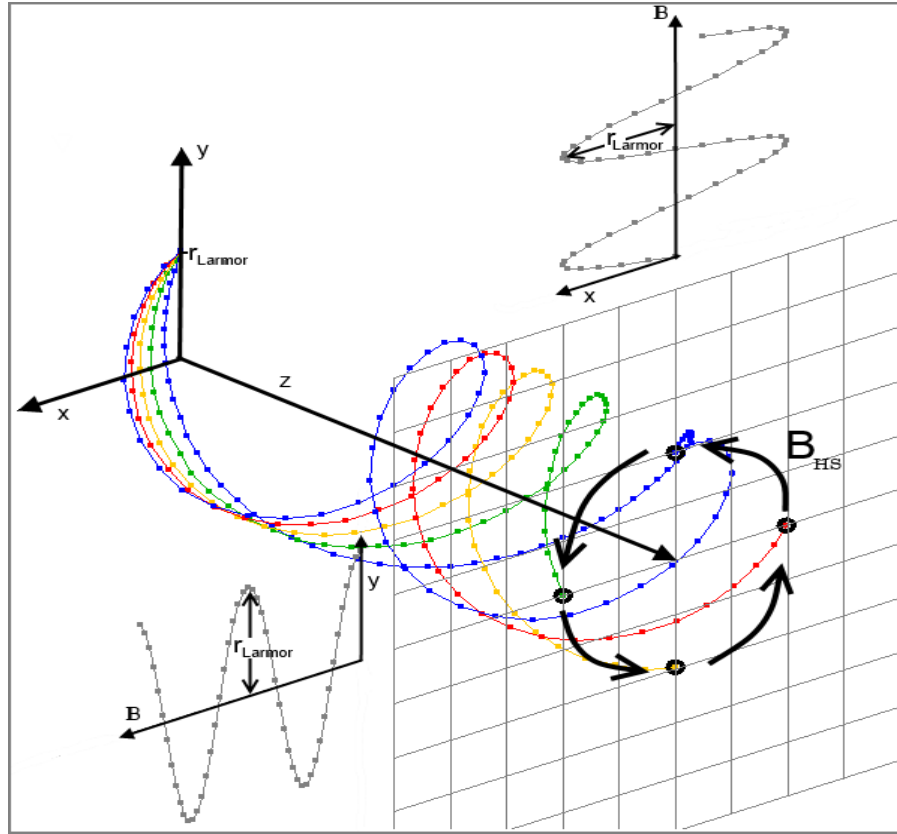


Abb. 2.2: Messung des Larmorradius. Mit Erhöhung des Spulenstroms I_{HS} (Hauptsoolenoid) wird die Spirale gestaucht. Dies wird als Oszillation in X und Y-Richtung über die magnetische Induktion sichtbar. Die Amplitude entspricht dem Larmorradius. Das Ende der blau dargestellten Strahlform zeigt einen ursprünglich gemessenen Strahlschwerpunkt. Mit Erhöhung des Stroms und damit der magnetischen Induktion rotiert der gemessene Strahlschwerpunkt mit dem Larmorradius um die Achse des Elektronenstrahls. Eine ganze Periode wird vollzogen, sobald die Anzahl der Larmorlängen auf der effektiven Strecke um eins erhöht wird.

Zur Messung des Larmorradius wird der Strom des Hauptsoolenoids schrittweise geändert. Die entsprechende Strahlposition als X- und Y-Koordinate werden parallel aufgenommen. Um eine numerische Regression der Messdaten durchzuführen, die den Larmorradius liefert, wird ω_s aus Gleichung (2.23) benötigt.

Es liegt folgender Funktionsverlauf zur Regression vor:

$$x_{pos} = f(I_{HS}) = a_x + b_x \cdot I_{HS} + c_x \cdot \sin(\omega_s \cdot I_{HS}) + d_x \cdot \cos(\omega_s \cdot I_{HS}) \quad (2.25)$$

$$y_{pos} = f(I_{HS}) = a_y + b_y \cdot I_{HS} + c_y \cdot \sin(\omega_s \cdot I_{HS}) + d_y \cdot \cos(\omega_s \cdot I_{HS}) \quad (2.26)$$

Die Parameter a , b , c und d ergeben sich jeweils aus der Regression für die X- und Y-Koordinate. a und b sind Teile der additiven und linearen Terme der Gleichung. c und d sind entsprechend die Amplituden der Sinus- und Kosinusfunktion. Die geometrische Addition der Amplituden führt letztlich zum Larmorradius. Damit sind $c_{x,y}$ und $d_{x,y}$ als Radiuskomponenten der Larmorrotation anzusehen.

Exemplarisch werden im Folgenden Messdaten dargestellt, in denen die hergeleiteten Größen zum Tragen kommen. Die Messdaten entspringen einer Larmorradiusmessung bei einer kinetischen Energie der Elektronen von 100 keV. Dies führt zur Frequenz $\omega_s = 1,47$ rad/A. Der Betriebsstrom des Hauptsolenoids lag bei 80 A. Die Messgrenzen befinden sich symmetrisch mit gleicher Differenz von 80 A entfernt. Mit einer Spanne von 6 A wird demnach der Strom von 77 A bis 83 A in 0,2 A Schritten erhöht.

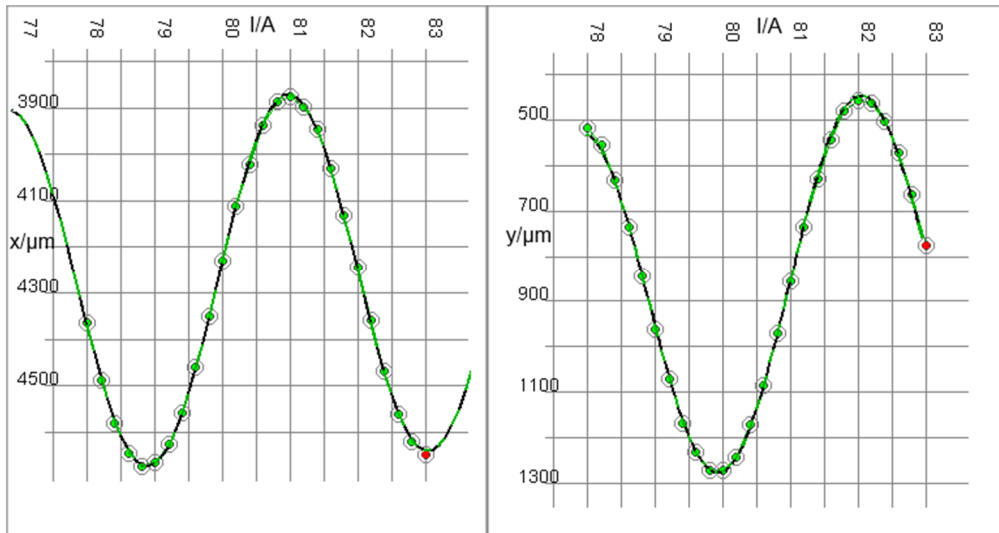


Abb. 2.3: Messdaten und Fits einer Larmorradiusmessung. Die Schwingungsterme des Funktionsverlaufs kommen durch die ausgeprägten Larmorrotation deutlich zum Tragen. Der Fit anhand der Gleichungen (2.25) und (2.26) ist in durchgängig in schwarz-grün dargestellt. Die Amplitude der Schwingungen kann abgelesen und qualitativ direkt als Larmorradius interpretiert werden. Die erhaltenen Parameter der numerischen Regression liefern exaktere Werte für den Larmorradius. Diese Darstellung stammt aus dem Programm zur automatisierten Larmorrotationskompensation, das mit dieser Arbeit entwickelt wurde.

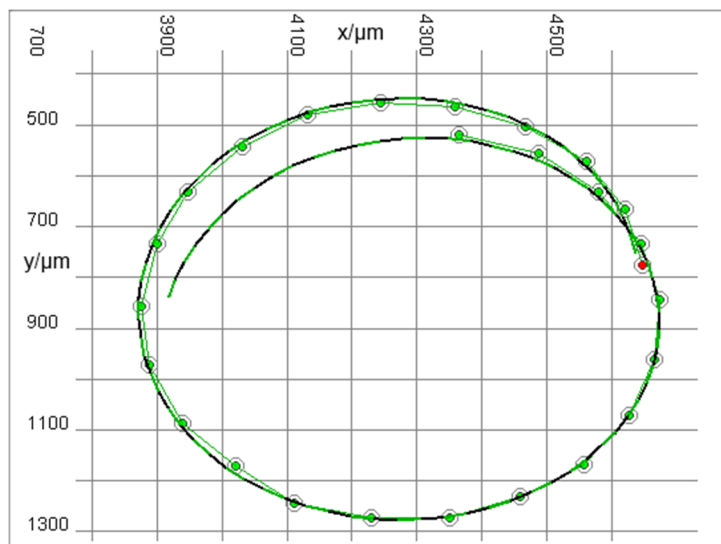


Abb. 2.4: XY-Darstellung der Messdaten zur Larmorradiusmessung. Messdaten setzen sich aus den X- und Y-Koordinaten bei jeweils gleichen Strömen zusammen. Der Reihenfolge wird durch Linien zwischen den Punkten verdeutlicht. In dieser Darstellung lässt sich der Larmorradius genähert direkt ablesen. Dieses Bild stammt ebenfalls aus dem Programm zur automatisierten Larmorrotationskompensation, das mit dieser Arbeit entwickelt wurde.

Eine Veränderung des Hauptsolenoidstroms hat ebenfalls Einfluss auf den Larmorradius (vgl. Gleichung (2.6)). Um diesen Effekt klein zu halten, werden nur kleine Stromänderungen von wenigen Ampere vollzogen während der Mittelwert der Messgrenzen bei dem Strom liegt, der im statischen Betrieb vorgesehen ist. Da sich der Radius direkt antiproportional zum Strom verhält, führt dies zum mittleren Radius bei dem Mittelwert der Messgrenzen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Larmorradiusmessung in ihrer Gesamtheit als Mess- und Berechnungsprozess aufgefasst, die den Larmorradius und seine Komponenten c und d liefert.

2.5 Der Kick eines Elektronenstrahls

Für eine vereinfachte Modellvorstellung wird der Kick als transversale Geschwindigkeitsänderung des Elektronenstrahls und damit als Auslöser der unerwünschten Larmorrotation eingeführt. Eine Reihe von verschiedenen Kicks wirkt auf den Elektronenstrahl bis dieser die Kühlstrecke erreicht und verursacht die dortige Larmorrotation.

Mit dem Radius der Rotation erhält man ein Maß für diesen Gesamtkick, der für eine Kompensation im Vordergrund steht.

Messungen des Verhaltens des Larmorradius auf Änderungen zweier spezieller Korrekturmagnetströme ermöglichen die Übermittlung eines berechneten Gegenkicks. Dieser kompensiert den Gesamtkick in der Kühlstrecke und behebt dort die Larmorrotation. Der Gegenkick wird durch zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Korrekturmagneten übermittelt. Diese Dipolmagnete sind durch ihren kurzen Einflussbereich in der Lage eine Winkelabweichung in der Strahlführung herbeizuführen, also einen Kick zu erzeugen. Durch ihre unvermeidliche räumliche Ausdehnung, tragen sie zusätzlich zu einer Orbitverschiebung des Elektronenstrahls bei. Damit ist der Offset $a_{x,y}$ (siehe Gleichung (2.25), (2.26)) vom Strom dieser Korrekturmagnete abhängig. Im weiteren Verlauf werden die zur Kompensation verwendeten Korrekturmagnete als vertikaler und horizontaler EDIP bezeichnet, da sie intern die Bezeichnung „EDIPVER-1 R9-5.6“ und „EDIPHOR-1 R9-5.7“ besitzen. EDIP steht dabei für electron dipole. Ihre Lage ist in der Abbildung 2.1 auf mit der Nummer 1) hervorgehoben.

Der Kick ist eine vektorielle Größe, dessen Betrag linear in den Larmorradius eingeht und der auf einer transversalen Ebene des Elektronenstrahls liegt. Der Normalvektor dieser Ebene zeigt in Ausbreitungsrichtung des Strahls. In vektorieller Form lässt sich der Kick mit den transversalen Komponenten u und v , während u parallel zu v steht, als zweidimensionaler Graph erfassen. Analog zur Komponentenschreibweise besitzt der Kick die Eigenschaft des Betrages und der Phase.

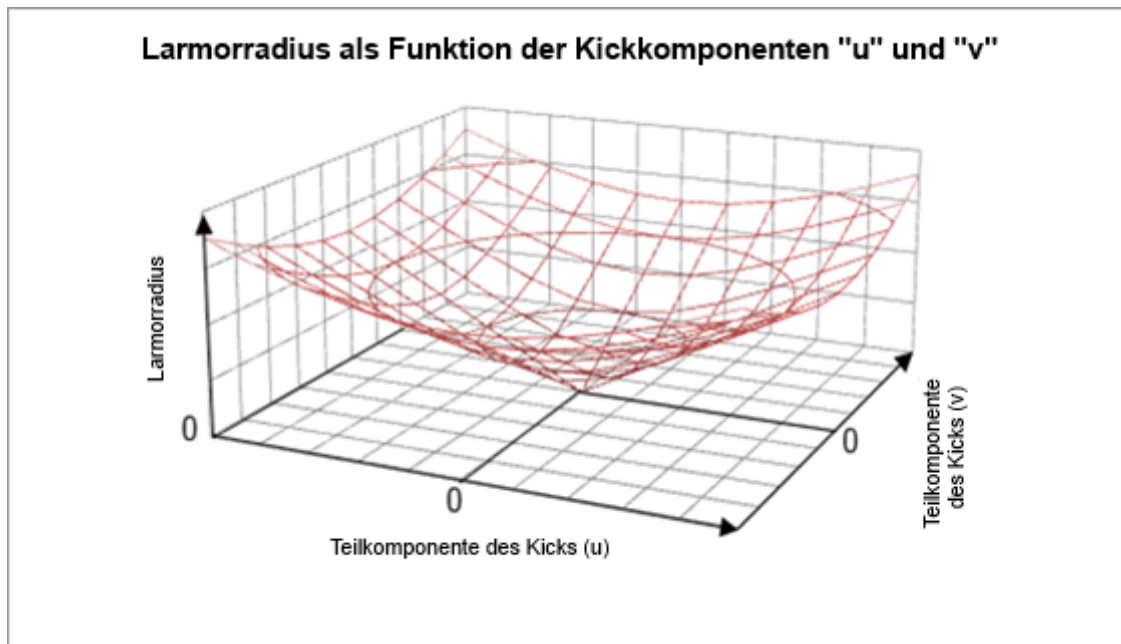


Abb. 2.5: Graph des Larmorradius als Funktion der Teilkomponenten. Simulierte Darstellung. Der Radius steigt linear ausgehend vom Ursprung bei $u=0$, $v=0$. Achsenskalierung ist beliebig. Proportionalität steht im Vordergrund.

Der erzeugte Kick der EDIP-Korrekturmagnete muss für eine Kompensation den gleichen Betrag mit umgekehrter Richtung zum unerwünschten Gesamtkicks besitzen.

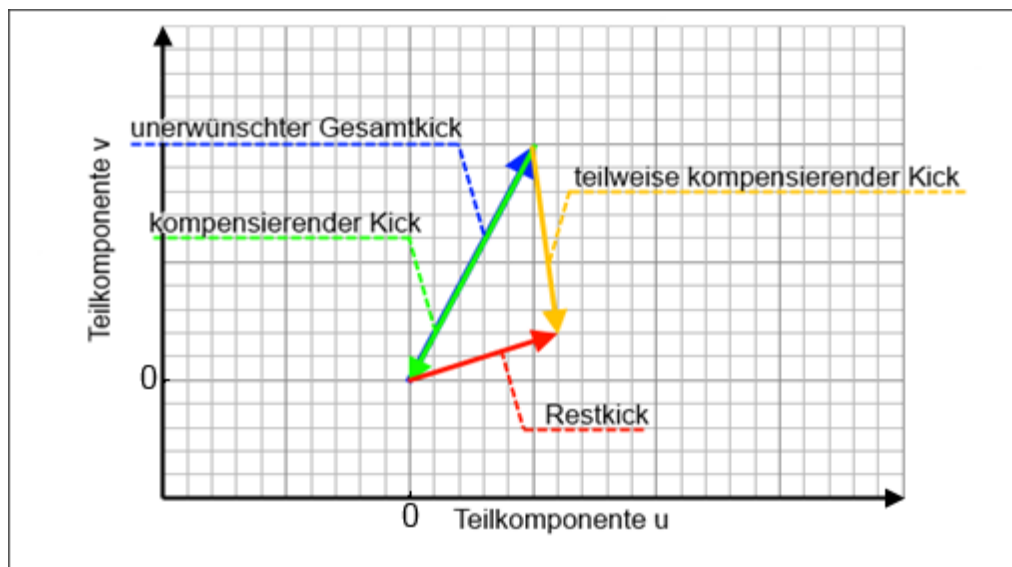


Abb. 2.6: Vektorielle Darstellung des Gesamtkicks und verschiedenen kompensierenden Kicks und einem Restkick. Es werden zwei Fälle dargestellt. Im Ersten wird der (blaue) Gesamtkick vollständig durch den (grünen) Gegenkick kompensiert. Im zweiten Fall wird der Gesamtkick durch den veränderten (gelben) Gegenkick nur teilweise kompensiert. Nach einer Einstellung der EDIP-Korrekturmagneten ist stets nur ein Restkick in der Kühlstrecke messbar.

Aus Abbildung 2.6 geht qualitativ die Vorstellung des Kickmechanismus hervor. Es wird davon ausgegangen, dass die Größe und Richtung des kompensierenden Kicks aus einer Linearkombination der EDIP-Korrekturmagnete erzeugt werden kann. Die Bestimmung der Regressionsparameter (siehe Gleichung (2.25), (2.26)) mit verschiedenen EDIP-Stromkombinationen liefern auf diese Weise Daten, die zum Gesamtkick und dem Einfluss der EDIP-Korrekturmagnete führen. Dies ermöglicht die Berechnung einer geeigneten Stromkombination der EDIP-Korrekturmagnete um dem Gesamtkick entgegenzuwirken. Die Methodik wird im folgenden Kapitel erläutert. Da die Ströme der Korrekturmagnete den Gegenkick verursachen, werden die Ströme der einzelnen Korrekturmagnete ebenfalls als Vektorkomponenten des Vektors EDIP- oder Stromkombination betrachtet.

3 Korrekturrechnung, Optimierung und Alternativen

Für die Kompensation der Larmorrotation durch Nutzung der beiden EDIP-Korrekturmagnete wird ein deterministischer Zusammenhang zwischen Strom der Korrekturmagnete und dem resultierenden Larmorradius aus dem Restkick benötigt. Dieser wird in diesem Kapitel als mathematisches Modell für das ursprüngliche Kompensationsverfahren vorgestellt. Verbesserungen der vorangegangenen Anwendung des Modells und zusätzliche Alternativen wurden entwickelt und folgen in den entsprechenden Unterkapiteln. Alle Modelle entsprechen Lösungsansätzen von Optimierungsproblemen, wie sie aus der Mathematik bekannt sind.

3.1 Ursprünglicher mathematischer Ansatz

Der Gesamtkick setzt sich in einer Betrachtung aus Betrag und Phase zusammen oder gleichermaßen aus zwei Komponenten, die senkrecht zueinander angeordnet sind. Die Proportionalität des Kicks mit dem Larmorradius lässt analog die Betrachtung der Radiuskomponenten $c_{x,y}$ und $d_{x,y}$ als Synonym der Kickkomponenten zu. Mit gegebenen Strömen der EDIP-Korrekturmagnete (folgend nur noch EDIP-Kombination) liefert die Larmorradiusmessung diese Größen, die den Restkick (siehe Abb. 2.6) charakterisieren.

Die EDIP-Kombination kann ebenfalls vektoriell betrachtet und als direkter Auslöser des Gegenkicks gesehen werden. Sie lässt sich damit ebenfalls aufgeteilt in Komponenten oder durch Betrag und Phase beschreiben.

Um eine theoretische Beziehung zwischen den Bezugsebenen der EDIP-Kombination und des Gesamtkicks zu schaffen ist eine Translation, Drehung und Skalierung notwendig. Eine Lineartransformation der Ströme in Restkickradiuskomponenten entspräche dieser Beziehung. Sie ermöglicht mit bekannten Parametern die Berechnung eines Gegenkicks und rückwirkend, durch ihre Inverse, die Bestimmung einer idealen EDIP-Kombination zur Kompensation des Gesamtkicks. Die Transformation lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\vec{r}_{Larmor} = L(\vec{I}_{EDIP}) \quad (3.1)$$

Dabei sind $\vec{r}_{Larmor,x} = \begin{pmatrix} c_x \\ d_x \end{pmatrix}$ und $\vec{I}_{EDIP} = \begin{pmatrix} I_{EDIP,HOR} \\ I_{EDIP,VER} \end{pmatrix}$.

$$c_x = I_{EDIP,VER} \cdot k_1 \cdot \sin(\varphi_{kick,dif}) + I_{EDIP,HOR} \cdot k_2 \cdot \cos(\varphi_{kick,dif}) + c_{x,off} \quad (3.2)$$

$$d_x = I_{EDIP,VER} \cdot k_3 \cdot \cos(\varphi_{kick,dif}) + I_{EDIP,HOR} \cdot k_4 \cdot \sin(\varphi_{kick,dif}) + d_{x,off} \quad (3.3)$$

$I_{EDIP,VER,HOR}$ entspricht einer gewählten EDIP-Kombination. Die additiven Offsets $c_{x,y,off}$ und $d_{x,y,off}$ entsprechen den Werten c und d , wenn die EDIP-Kombination (0,0) beträgt.

φ_{kick_dif} ist der Phasenunterschied der Bezugsebenen des erzeugten Kicks und des Gesamtkicks und ist eine Konstante.

k_i ($i=1-4$) ist ein Proportionalitätsfaktor, der die eingesetzten Ströme der Korrekturmagnete in die entsprechenden Komponenten überführt. Das Produkt aus der trigonometrischen Funktion mit konstanten Argument ρ_{kick_dif} und dem Faktor k_i ergibt eine Konstante.

Dies führt zur Vereinfachung:

$$I_{EDIP_VER} \cdot dS_{x,ver} + I_{EDIP_HOR} \cdot dS_{x,hor} + c_{x,off} = c_x \quad (3.4)$$

$$I_{EDIP_VER} \cdot dC_{x,ver} + I_{EDIP_HOR} \cdot dC_{x,hor} + d_{x,off} = d_x \quad (3.5)$$

Die eingeführten Konstanten dS und dC sind Gradienten der Parameter c und d über den jeweils veränderten Strom. „ S “ und „ C “ bezeichnen den Bezug zu den Sinus- und Cosinusvorfaktoren $c_{x,y}$ und $d_{x,y}$.

Dieses Verfahren nutzt 3 Messpunkte zur Bestimmung der unbekannten Parameter, um letztlich mit einem linearen Gleichungssystem die ideale EDIP-Kombination zu berechnen. Ausgehend von einer gewählten EDIP-Kombination als Bezugspunkt werden Larmorradiusmessungen durchgeführt. Eine Messung liegt beim Bezugspunkt, zwei weitere Messpunkte liegen um 1 Ampere jeweils horizontal und vertikal verschoben neben dem Bezugspunkt. Entsprechend der Tabelle 3.1 werden folgende Werte berechnet.

Tab. 3.1: Berechnete Gradienten für die Korrekturrechnung.

Gradienten	
$dS_{x,ver} = \frac{c_{x1} - c_{x3}}{I_{EDIP_VER1} - I_{EDIP_VER3}}$	$dS_{y,ver} = \frac{c_{y1} - c_{y3}}{I_{EDIP_VER1} - I_{EDIP_VER3}}$
$dC_{x,ver} = \frac{d_{x1} - d_{x3}}{I_{EDIP_VER1} - I_{EDIP_VER3}}$	$dC_{y,ver} = \frac{d_{y1} - d_{y3}}{I_{EDIP_VER1} - I_{EDIP_VER3}}$
$dS_{x,hor} = \frac{c_{x1} - c_{x2}}{I_{EDIP_HOR1} - I_{EDIP_HOR2}}$	$dS_{y,hor} = \frac{c_{y1} - c_{y2}}{I_{EDIP_HOR1} - I_{EDIP_HOR2}}$
$dC_{x,hor} = \frac{d_{x1} - d_{x2}}{I_{EDIP_HOR1} - I_{EDIP_HOR2}}$	$dC_{y,hor} = \frac{d_{y1} - d_{y2}}{I_{EDIP_HOR1} - I_{EDIP_HOR2}}$

Die Tabelle enthält alle berechneten Gradienten, die für die Korrekturrechnung benötigt werden.

Die Berechnung der idealen EDIP-Kombination ergibt ein relatives Ergebnis zum Bezugspunkt $I_{EDIP_VER,HOR1}$, da der Offset bei der EDIP-Kombination (0,0) nicht notwendigerweise bekannt ist.

Die Bedingung zur Berechnung der kompensierenden EDIP-Kombination ist ein Radius von null und damit c und d gleich null.

Mit dieser Bedingung gilt zunächst allgemein:

$$dS_{x,hor} \cdot I_{ideal\ EDIP_HOR} + dS_{x,ver} \cdot I_{ideal\ EDIP_VER} + c_{x,off} = 0 \quad (3.6)$$

$$dC_{x,hor} \cdot I_{ideal\ EDIP_HOR} + dC_{x,ver} \cdot I_{ideal\ EDIP_VER} + d_{x,off} = 0 \quad (3.7)$$

Relativ zum Bezugspunkt folgt daraus:

$$dS_{x,hor} \cdot (I_{ideal\ EDIP_{HOR}} - I_{EDIP_{HOR1}}) + dS_{x,ver} \cdot (I_{ideal\ EDIP_{VER}} - I_{EDIP_{HOR1}}) = -c_{x1} \quad (3.8)$$

$$dC_{x,hor} \cdot (I_{ideal\ EDIP_{HOR}} - I_{EDIP_{HOR1}}) + dC_{x,ver} \cdot (I_{ideal\ EDIP_{VER}} - I_{EDIP_{VER1}}) = -d_{x1} \quad (3.9)$$

Das aufgelöste lineare Gleichungssystem ergibt:

$$I_{ideal\ rel\ EDIP_{HOR}} = (I_{ideal\ EDIP_{HOR}} - I_{EDIP_{HOR1}}) = \frac{-(c_{x1} \cdot dC_{x,ver} - d_{x1} \cdot dS_{x,ver})}{dS_{x,hor} \cdot dC_{x,ver} - dS_{x,ver} \cdot dS_{x,hor}} \quad (3.10)$$

$$I_{ideal\ rel\ EDIP_{VER}} = (I_{ideal\ EDIP_{VER}} - I_{EDIP_{VER1}}) = \frac{c_{x1} \cdot dC_{x,hor} - d_{x1} \cdot dS_{x,hor}}{dS_{x,hor} \cdot dC_{x,ver} - dS_{x,ver} \cdot dS_{x,hor}} \quad (3.11)$$

Zusammengeführt können die Gleichungen (3.8) und (3.9) als Ebenen in einem zweidimensionalen Graphen dargestellt werden. Die Gradienten stehen senkrecht aufeinander und spannen die Ebene beim Bezugspunkt auf.

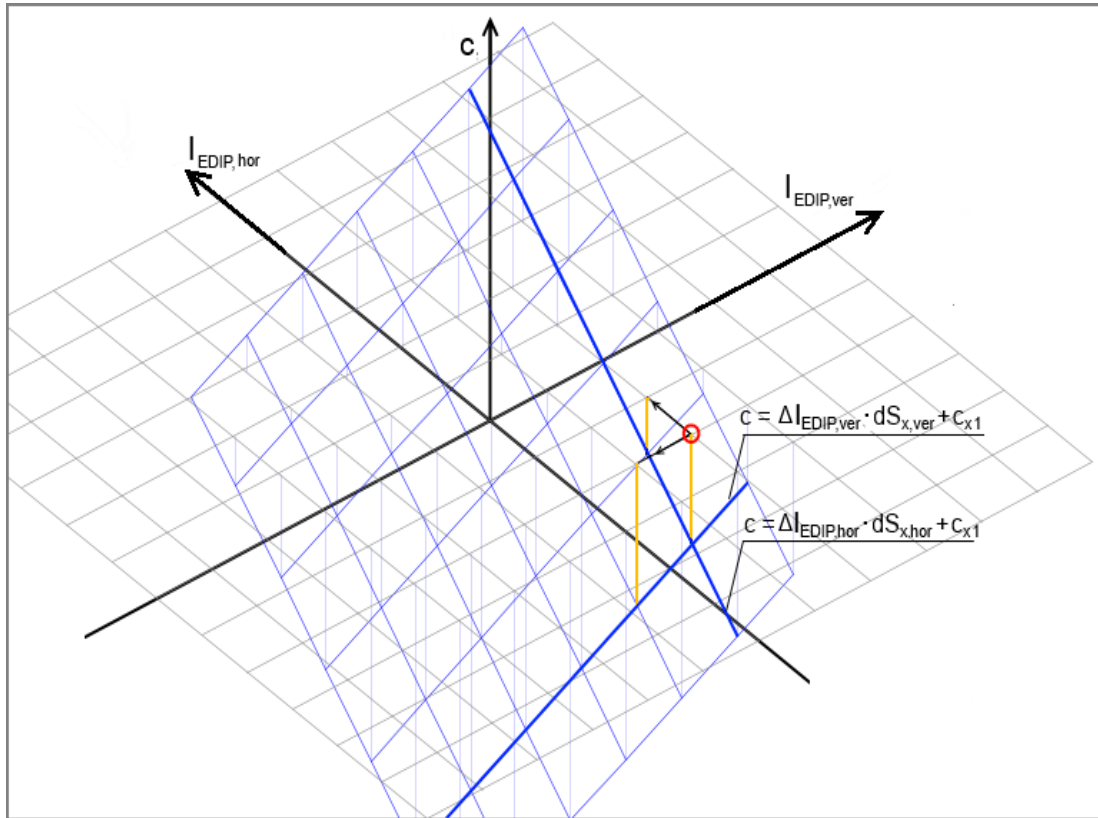


Abb. 3.1: Zweidimensionaler Graph der Larmorradiuskomponente c über EDIP-Ströme. Für die Komponenten c und d entsteht jeweils eine Ebene. Die Messung der Larmorradien an drei EDIP-Kombinationen. Aufgenommene Messpunkte werden durch orangene Linien verdeutlicht. Bezugspunkt ist durch einen roten Kreis hervorgehoben.

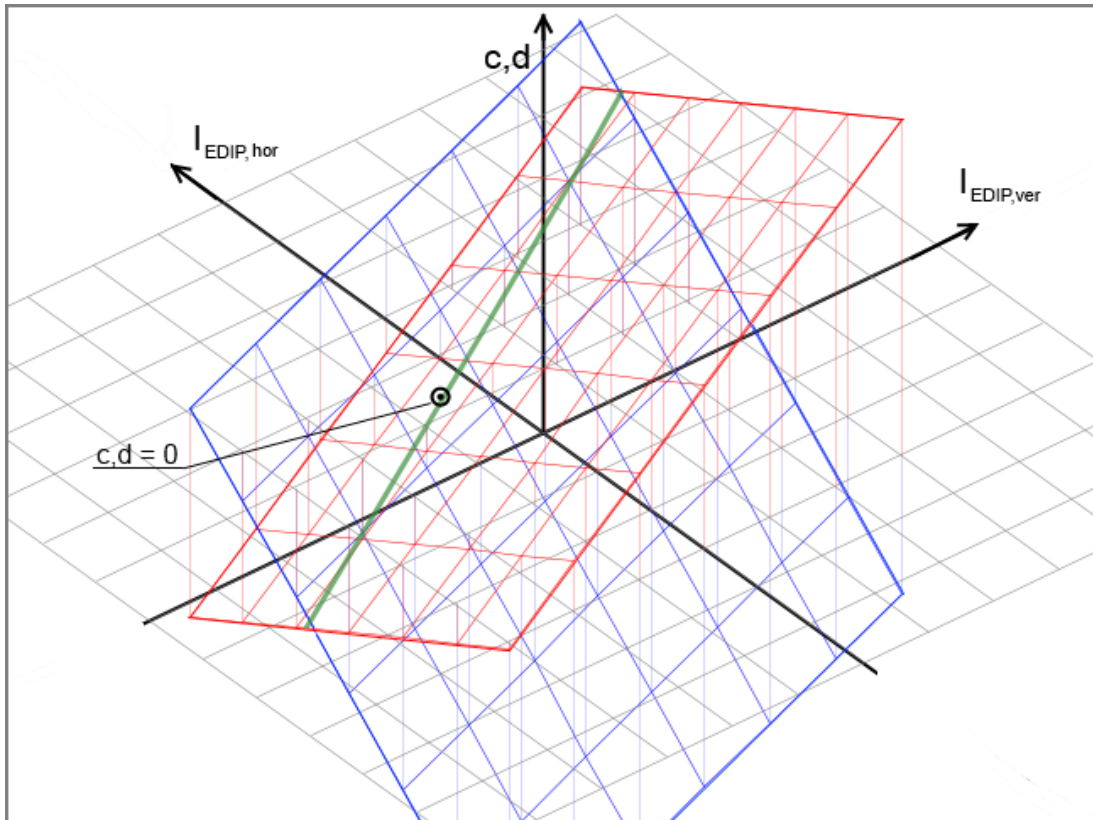


Abb. 3.2: Schnitt der Ebenen, die durch die Verteilung der Radiuskomponenten c und d über Korrekturstrome aufgespannt wird. Analoge Darstellung zu Abb. 3. 1. Hier sind beide Ebenen für c und d zu sehen. Die grüne Gerade zeigt den Spezialfall $c=d$. Schwarzen Kreis hebt $c, d=0$ hervor.

Letztlich gilt:

$$I_{ideal\ EDIP_{VER}} = I_{ideal\ rel\ EDIP_{VER}} + I_{EDIP_{VER}1} \quad (3.12)$$

$$I_{ideal\ EDIP_{HOR}} = I_{ideal\ rel\ EDIP_{HOR}} + I_{EDIP_{HOR}1} \quad (3.13)$$

Die Berechnung der idealen EDIP-Kombination erfolgt separat für die Daten aus den einzelnen Koordinaten. Die ermittelten Lösungen werden erst am Ende gemittelt und führen zum Endergebnis. Für weitere Bezüge wird dieses Verfahren „einfache lineare Korrekturrechnung“ genannt.

3.1.1 Schwächen des Verfahrens

Die Korrekturrechnung ist durch ihre strikte Festlegung der Messpunktfolgenfolge sehr unflexibel und bedient damit nur einen speziellen Fall. Mit nur drei Messpunkten kann keine Mittelung der Messdaten stattfinden, wodurch sich jede Abweichung auf das Ergebnis auswirkt. Die Fehleranfälligkeit und Schwächen des gesamten manuellen Verfahrens liegen zum einen bei der manuellen Übertragung aller für die Berechnung notwendigen Daten, da Werte falsch übernommen oder eingetragen werden können. Dabei kann die Schwäche menschlicher Fehler durch die Softwarelösung vollständig behoben wer-

den, da der Benutzer keinen Zugriff auf die Daten hat und Daten mit allen signifikanten Stellen fehlerfrei übernommen werden. Die Auswirkung der Messwertabweichungen wird durch die „optimierte lineare Korrekturrechnung“ und die „fortgeschrittene lineare Korrekturrechnung“ minimiert, die folgend beschrieben werden.

3.2 Alternative mathematische Ansätze

3.2.1 Optimierte lineare Korrekturrechnung

Im Gegensatz zur „einfachen linearen Korrekturrechnung“ werden die verwendeten Daten der verschiedenen Koordinaten nicht separat behandelt. Die Komponenten des Radius c und d aus den Daten der Y-Koordinate haben eine Phasenverschiebung von 90° gegenüber den Daten der X-Koordinate. Damit lassen sich die Werte der einen Koordinate durch Rotation in die Andere überführen. Die Komponenten des Larmorradius c und d lassen sich nach der Rotation mitteln. Mit der verkleinerten Unsicherheit der Messdaten erhält man ein sichereres Ergebnis, im Vergleich zur „einfachen linearen Korrekturrechnung“. Die senkrechten trigonometrischen Funktionen Sinus und Kosinus erlauben dazu folgende Schritte:

$$c_{neu} = \frac{c_x + (-d_y)}{2} \quad (3.14), \quad d_{neu} = \frac{d_x + c_y}{2} \quad (3.15)$$

Dieser Optimierungsschritt wird für jeden der drei Messpunkte durchgeführt. Die weitere Berechnung ist analog zur „einfachen linearen Korrekturrechnung“.

3.2.2 Fortgeschrittene lineare Korrekturrechnung

Entsprechend der Gleichungen (3.8) und (3.9) und der Abbildung 3.1 bilden die Komponenten des Larmorradius Ebenen. Diese Ebenen werden in den einfachen „linearen Korrekturrechnungen“ durch zwei Graden aufgespannt, die sich aus drei Messpunkten zusammensetzen. Die Ebenen können jedoch ebenfalls durch eine Regression über eine Schar von Messpunkte, mindestens jedoch drei, bestimmt werden. Dieses Verfahren bietet durch ihre allgemeine Form einen direkten Bezug zur EDIP-Kombination (0,0) und steht in keinem relativen Bezug, vergleichbar mit Gleichung (3.6) und (3.7).

Ermittelt man so zunächst die Gradienten und die Offsets lassen sich diese direkt in die folgenden Gleichungen (3.16) und (3.17) einsetzen und führen zur idealen EDIP-Kombination. Die Optimierung durch Rotation der Daten der y-Koordinate erfolgt hier analog zur „optimierten linearen Korrekturrechnung“ für alle Messpunkte.

Eingesetzt in das aufgelöste lineare Gleichungssystem mit der Bedingung $c, d = 0$ ergibt sich:

$$I_{ideal\ EDIP_{HOR}} = \frac{-(c_{off} \cdot d_{C_{ver}} - d_{off} \cdot d_{S_{ver}})}{d_{S_{hor}} \cdot d_{C_{ver}} - d_{S_{ver}} \cdot d_{S_{hor}}} \quad (3.16)$$

$$I_{ideal\ EDIP_{VER}} = \frac{c_{off} \cdot d_{C_{hor}} - d_{off} \cdot d_{S_{hor}}}{d_{S_{hor}} \cdot d_{C_{ver}} - d_{S_{ver}} \cdot d_{S_{hor}}} \quad (3.17)$$

Durch Aufnahme einer Vielzahl von Messpunkten werden die Auswirkungen der Messwertabweichungen minimiert. Im Hinblick auf einen automatisierten Vorgang über mehrere Iterationen ist es mit diesem Verfahren möglich, beliebig viele Messpunkte und jene früherer Iterationen in die Korrekturrechnung zu übernehmen.

3.2.3 Quadratische Korrekturrechnung

Die sogenannte quadratische Korrekturrechnung zieht die Verteilung der Larmorradien über die EDIP-Kombinationen in Betracht. Dabei geht das entwickelte Modell von einem Larmorradius mit einem Wert von null an der gesuchten idealen EDIP-Kombination aus. Mit steigender Entfernung von der gesuchten EDIP-Kombination, also durch Änderung der Ströme, vergrößert sich der Larmorradius linear. Dies ist vergleichbar mit einem einfachen zweidimensionalen Optimierungsproblem [12-13]. Quadrate der Radian verteilen sich in diesem Modell nach einem Polynom zweiter Ordnung über die EDIP-Ströme.

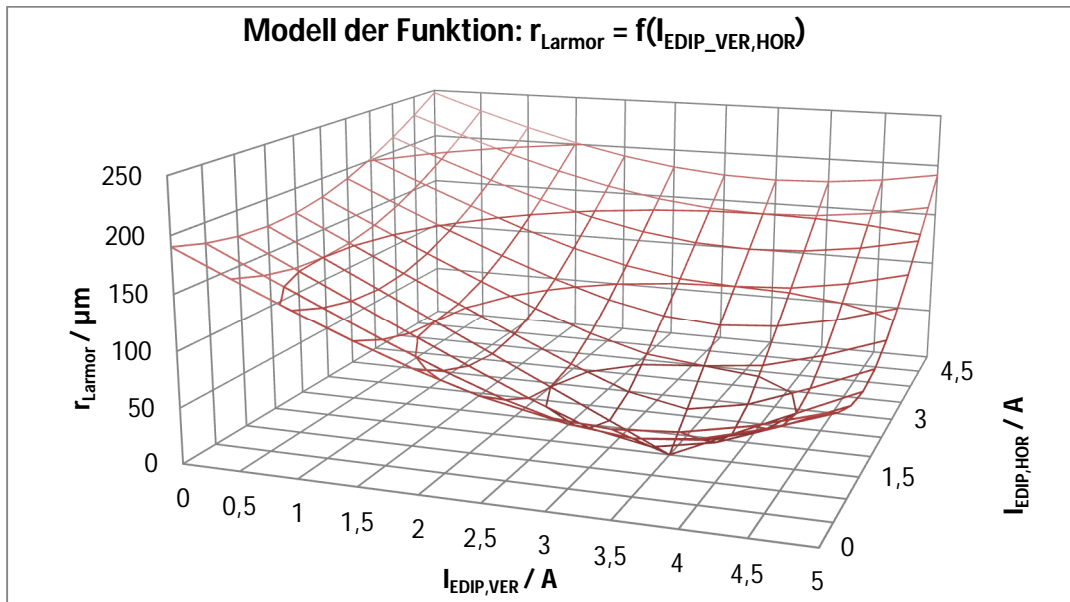


Abb. 3.3: Exemplarische Modellierung der mathematischen Funktion zur Ermittlung der idealen Stromkombination in 3D. Die Abbildung zeigt eine simulierte Verteilung von Larmorradien über EDIP-Ströme. Ausgehend vom Scheitelpunkt an der gesuchten EDIP-Kombination steigt die Funktion in alle Richtungen linear an.

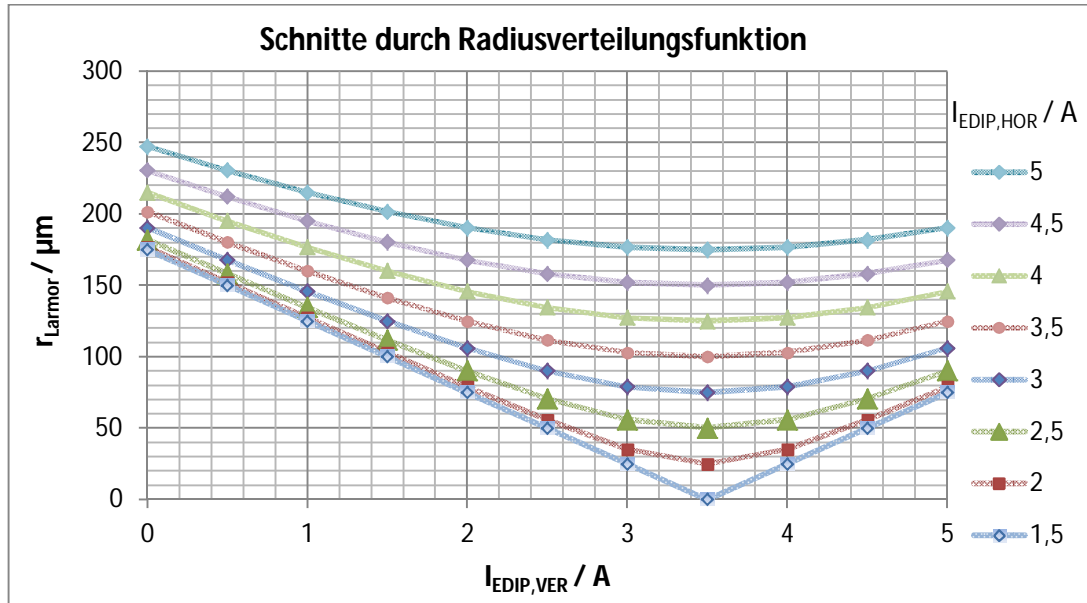


Abb. 3.4: Modellierung der quadratischen Larmorradienverteilung über verschiedene EDIP-Kombinationen. Analoge Darstellung zu Abbildung 3.3 in Schnitten durch den Graphen.

Der Funktionsverlauf kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$r_{Larmor} = \sqrt{g \cdot ((I_{ideal\ EDIP_{VER}} - I_{EDIP_{VER}})^2 + (I_{ideal\ EDIP_{HOR}} - I_{EDIP_{HOR}})^2)} \quad (3.18)$$

Zur Berechnung der idealen Stromkombination wurde die Formel aufgelöst, um die folgende parametrisierte Form zu erhalten.

$$r_{Larmor}^2 = g \cdot (I_{EDIP_{VER}}^2 + I_{EDIP_{HOR}}^2) + g \cdot (I_{ideal\ EDIP_{VER}}^2 + I_{ideal\ EDIP_{HOR}}^2) - 2g \cdot I_{ideal\ EDIP_{VER}} \cdot I_{EDIP_{VER}} - 2g \cdot I_{ideal\ EDIP_{HOR}} \cdot I_{EDIP_{HOR}} \quad (3.19)$$

Eine Substitution vereinfachte die Formel weiter zu:

$$w = \alpha(x^2 + y^2) + \beta x + \gamma y + \delta \quad (3.20)$$

Dabei sind:

$$w = r_{Larmor}^2,$$

$$\alpha = g,$$

$$\beta = -2g \cdot I_{ideal\ EDIP_{VER}},$$

$$\gamma = -2g \cdot I_{ideal\ EDIP_{HOR}},$$

$$\delta = g \cdot (I_{EDIP_{VER_ideal}}^2 + I_{EDIP_{HOR_ideal}}^2),$$

$$x = I_{EDIP_{VER}},$$

$$y = I_{EDIP_{HOR}}$$

β und γ sind hier keine relativistischen Faktoren.

Nach dieser Formel können gemessene Radien mit den dazugehörigen EDIP-Kombinationen gefittet werden. Mit vier unbekannten Größen werden mindestens vier Messpunkte benötigt, um das Gleichungssystem zu lösen. Die Größe δ setzt sich aus wei-

teren Größen zusammen und liefert durch ihre Gleichung eine zusätzliche Bedingung. Eine mögliche Vereinfachung wurde zur Beibehaltung der allgemeinen Form nicht durchgeführt.

Durch dieses Verfahren wird die Unsicherheit der Messdaten reduziert, da Larmorradien als zusammengesetzte Größe der Regressionsparameter verwendet werden. Durch die alleinige Betrachtung des Radius, die proportional zum Betrag des Kicks ist, geht jedoch die Phaseninformation des Kicks verloren. Deshalb liefert dieses Verfahren bei typischen Messwertabweichungen erst nach mehr als vier Messpunkten ein verlässliches Ergebnis. Zusätzlich wird durch dieses Verfahren angenommen, dass Änderungen der beiden EDIP-Korrekturmagnete sich gleichartig auf den Elektronenstrahl auswirken. Ein erweiterter Ansatz liegt mit der bi-quadratischen Korrekturrechnung vor.

3.2.4 Bi-quadratische Korrekturrechnung

Mit der Annahme, dass vertikale und horizontale Stromänderungen ungleiche Auswirkungen auf den Elektronenstrahl haben, wurde die quadratische Lösung modifiziert und zu einer bi-quadratischen Lösung erweitert. Aus technischer Sicht übernehmen der vertikale und horizontale Korrekturmagnet die gleiche Aufgabe, jedoch in unterschiedliche räumliche Dimensionen. Aufgrund der asymmetrischen Geometrie des Kühlers können so unterschiedliche Einflussfaktoren entstehen.

Mathematisch formuliert entspricht diese Erweiterung folgender Formel:

$$r_{Larmor} = \sqrt{g_1 \cdot (I_{ideal\ EDIP_{VER}} - I_{EDIP_{VER}})^2 + g_2 \cdot (I_{ideal\ EDIP_{HOR}} - I_{EDIP_{HOR}})^2} \quad (3.21)$$

Die Aufteilung des Faktors g in g_1 und g_2 (vgl. Gleichung (3.18)) ermöglicht die alternative bi-quadratische Rechnung. Dies resultiert in eine als Erhöhung des Freiheitsgrades der Funktion.

Die Auflösung der Formel ist analog zur quadratischen Lösung. Für dieses Verfahren werden mindestens 5 Messpunkte benötigt.

Eine Schwäche des Verfahrens ergibt sich durch den erhöhten Freiheitsgrad der Funktion. Mit wenigen Messpunkten liegt der Funktionsverlauf, dicht an den zugeführten Messpunkten und glättet kaum Messwertabweichungen. Die Parameter g_1 und g_2 können so auch stark verschiedene Werte annehmen. Für kleine Unterschiede zwischen den Einflussfaktoren führt die quadratische Rechnung bei gleichen Messwertabweichungen mit weniger Messpunkten dichter an die ideale EDIP-Kombination.

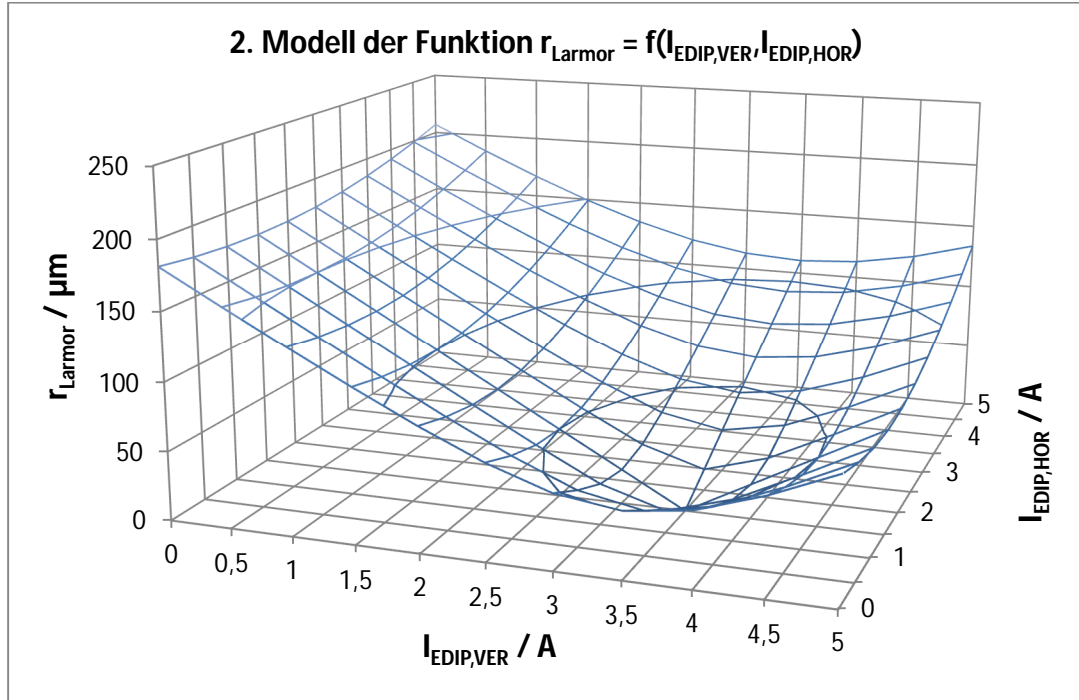


Abb. 3.5: Dargestellte bi-quadratische Verteilung der Larmorradien als Funktion der EDIP-Stromkombination. Analoge Darstellung 3.3. Die Faktoren g_1 und g_2 sind zur Verdeutlichung der Verteilung stark verschieden. Der Funktionsverlauf nimmt in $I_{\text{EDIP,VER}}$ -Richtung nach außen stärker zu.

3.3.5 Linearer Näherungsansatz

Der lineare Näherungsansatz wurde entwickelt, um mit wenigen Messpunkten schnell zu einer günstigeren EDIP-Kombination zu gelangen. Die Messpunkte sind vergleichbar mit der einfachen „linearen Korrekturrechnung“ angeordnet. Es werden die jeweiligen Gradienten des Larmorradius in Abhängigkeit der veränderten Ströme berechnet und als negative Vektorkomponenten eingesetzt. Dieser Vektor wird in den Mittelpunkt der Messpunkte, dem folgenden Bezugspunkt dieses Verfahrens, gelegt. Der Vektor zeigt mit der Richtung des negativen Gradienten auf den Nullpunkt des Graphen. Das Modell ist vergleichbar mit dem Gradientenverfahren [12-13] aus der Optimierung, als Gebiet der angewandten Mathematik.

Die jeweiligen Gradienten $\frac{d r_{\text{Larmor}}}{d I_{\text{EDIP,VER}}}$ und $\frac{d r_{\text{Larmor}}}{d I_{\text{EDIP,HOR}}}$ ergeben sich aus:

$$\frac{d r_{\text{Larmor}}}{d I_{\text{EDIP,VER}}} = \frac{\Delta r_{\text{Larmor}}}{\Delta I_{\text{EDIP,VER}}} \quad (3.22), \quad \frac{d r_{\text{Larmor}}}{d I_{\text{EDIP,HOR}}} = \frac{\Delta r_{\text{Larmor}}}{\Delta I_{\text{EDIP,HOR}}} \quad (3.23)$$

Der Betrag der senkrechten Gradienten ergibt den Gesamteinfluss der Stromänderung in Richtung der idealen EDIP-Kombination.

$$L = \sqrt{\left(\frac{d r_{\text{Larmor}}}{d I_{\text{EDIP,VER}}}\right)^2 + \left(\frac{d r_{\text{Larmor}}}{d I_{\text{EDIP,HOR}}}\right)^2} \quad (3.24)$$

Im Schnitt durch den Graphen zwischen dem Bezugspunkt und der idealen EDIP-Kombination bildet L den Gradienten als Abhängigkeit des Larmorradius von der EDIP-Kombination in diesem Schnitt.

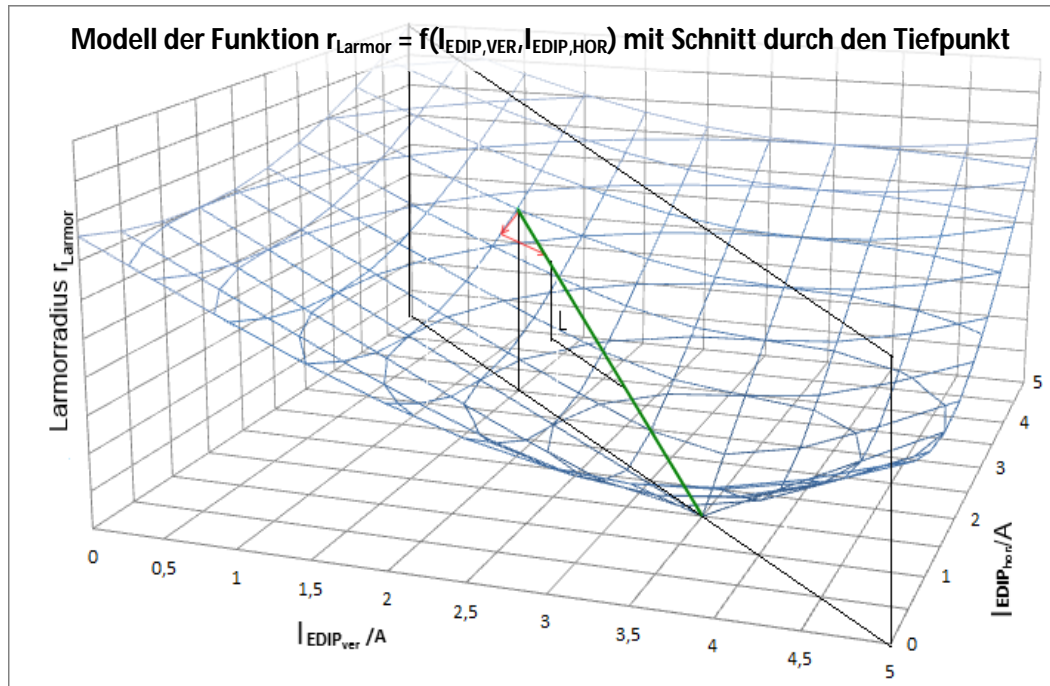


Abb. 3.6: Linearer Trend im Schnitt durch den Nullpunkt ausgehend vom Bezugspunkt. Rot dargestellt sind die Gradienten nach Gleichung (3.22) und (3.23). Die grüne gerade zeigt den linearen Verlauf des zusammengesetzten Vektors. Es gilt zu beachten, dass die Summe der einzelnen negativen Gradienten als Vektorkomponenten nicht den exakten linearen Verlauf des Graphen trifft. Der Verlauf des Graphen kann durch den Vektor nur angenähert werden.

Die Verhältnismaße „k“ ermöglichen die Berechnung des gesuchten Verhältnisses zwischen den Strömen, um den Schnitt zu bilden.

$$k_{ver} = \frac{d r_{Larmor} / d I_{EDIP,VER}}{L} \quad (3.25)$$

$$k_{hor} = \frac{d r_{Larmor} / d I_{EDIP,HOR}}{L} \quad (3.26)$$

Der Schnitt durch den Graphen wird durch folgende Bedingungen erfüllt:

$$I_{EDIP,VER} = (I_{EDIP,HOR} - I_{EDIP,HOR,mittel}) \cdot \frac{k_{ver}}{k_{hor}} + I_{EDIP,VER,mittel} \quad (3.27)$$

$$I_{EDIP,HOR} = (I_{EDIP,VER} - I_{EDIP,VER,mittel}) \cdot \frac{k_{hor}}{k_{ver}} + I_{EDIP,HOR,mittel} \quad (3.28)$$

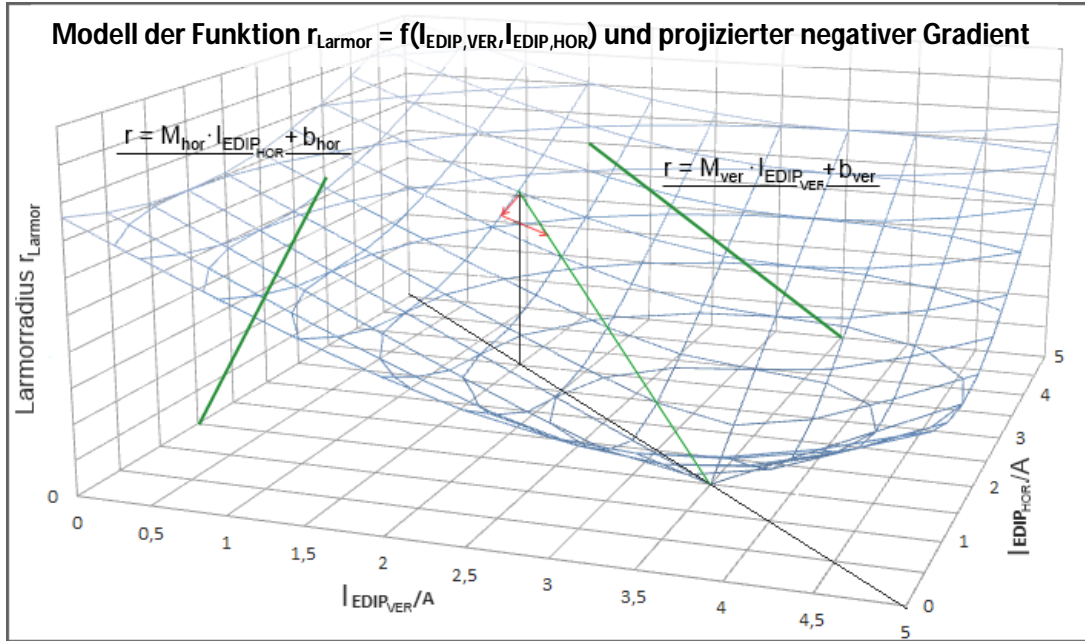


Abb. 3.7: Projektion der Geraden durch den Nullpunkt auf die jeweilige horizontale und vertikale Komponente. Die projizierten Geraden können durch die angegebenen Geradengleichungen beschrieben werden.

Zur Ermittlung der idealen EDIP-Kombination wird der Schnitt des Graphen auf die vertikale und horizontale Komponente projiziert.

Die Steigungen M_{ver} und M_{hor} ergeben sich jeweils aus:

$$M_{ver} = \frac{L}{k_{ver}} \quad (3.29), \quad M_{hor} = \frac{L}{k_{hor}} \quad (3.30)$$

Mit dem Bezugspunkt als bekannten Punkt der Geraden und den Steigungen ist der lineare Verlauf vollständig definiert. In diesem Beispiel wird der Strom des vertikalen Korrekturmagneten zuerst geändert.

$$I_{EDIP_{VER} \text{ mittel}} = \frac{I_{EDIP_{VER} 1} + I_{EDIP_{VER} 2}}{2} \quad (3.31)$$

$$r_{Larmor \text{ mittel}} = \frac{r_{Larmor 2} + r_{Larmor 3}}{2} \quad (3.32)$$

$$r_{Larmor} = M_{ver} \cdot I_{EDIP_{VER}} + b_{ver} \quad (3.33)$$

$$b_{ver} = r_{Larmor \text{ mittel}} - M_{ver} \cdot I_{EDIP_{VER} \text{ mittel}} \quad (3.34)$$

$$r_{Larmor} = f(I_{EDIP_{VER}}) \rightarrow 0 = f(I_{ideal \ EDIP_{VER}}) \quad (3.38)$$

$$I_{ideal \ EDIP_{VER}} = -b_{ver}/M_{ver} \quad (3.36)$$

Die Berechnung gilt analog für die horizontale Komponente mit folgendem Unterschied:

$$I_{EDIP_{HOR} \text{ mittel}} = \frac{I_{EDIP_{HOR} 1} + I_{EDIP_{HOR} 3}}{2} \quad (3.37)$$

4 Experimentelles und Modellvergleich

4.1 Larmorradiusmessungen über ein Feld von EDIP-Kombinationen

Zur Überprüfung der theoretischen Modelle, die die Basis der Korrekturrechnungen bilden, wurden zahlreiche Larmorradien über verschiedene EDIP-Kombinationen gemessen. Die Elektronenenergie betrug 95,8 keV mit einem Strom von 10 mA. Da es sich um eine typische Einstellung handelte, ist die ideale EDIP-Kombination bekannt und liegt bei $I_{ideal\ EDIP,VER} = 1,1\text{ A}$ und $I_{ideal\ EDIP,HOR} = 4,2\text{ A}$.

Das Programm zur Larmorrotationskompensation, das mit dieser Arbeit entwickelt wurde, befand sich zum Zeitpunkt der Messung in der Pre-Alpha-Phase und beinhaltete bereits alle Funktionen des manuellen Kompensationsverfahrens. Mehr Details zur Software sind im Kapitel 5.2 aufgeführt. Dieses Programm wurde zur Aufnahme der folgenden Messung verwendet.

Es wurden 94 Messungen der Larmorradien mit unterschiedlichen EDIP-Kombinationen durchgeführt. Die Messpunkte lagen zum Teil dicht mit kleinen Stromänderungen von $\Delta I_{EDIP,v,h,1} = 0,25\text{ A}$ an der bekannten idealen EDIP-Kombination und mit $\Delta I_{EDIP,v,h,2} = 1\text{ A}$ Schritten weiter über das Feld aller EDIP-Kombinationen verteilen. Die Netzgeräte der EDIP-Korrekturmagnete begrenzen das Feld von jeweils -6 bis 6 A für den horizontalen und den vertikalen Korrekturmagneten.

Für den Modellvergleich werden die charakteristischen Parameter der Korrekturrechnung, die über alle Messreihen berechnet werden, mit den gemessenen Daten selbst verglichen. Der Vergleich der Modelle erfolgt qualitativ durch die Betrachtung der Messdaten neben Modelldaten und quantitativ durch Berechnung des Determinationskoeffizienten.

Die Messdaten werden als Radiuskomponenten c und d und als Radien über die EDIP-Kombinationen dargestellt. Der Modellvergleich wird in Schnitten des EDIP-Feldes mit einem variablen und einem konstanten EDIP-Strom veranschaulicht. Die Larmorradienverteilung über das EDIP-Feld für die quadratischen Modelle wird zusätzlich mit dem quadrierten Radien dargestellt, da sich damit die konusförmige Verteilung der Radien als Parabel abzeichnet. Gemessene Larmorradien sind stets positiv, deshalb führt das Quadrieren zu keinem Informationsverlust.

Messergebnisse und Diagramme der Larmorradiusmessung über ein Feld von EDIP-Kombinationen befinden sich im Anhang A und B.

4.2 Überprüfung des linearen Modells

Für die Radiuskomponenten c und d (vgl. Gleichung (2.25), (2.26)) wird ein lineares Verhalten mit den Strömen der EDIP-Korrekturmagnete angenommen. Dieser ist exemplarisch in der folgenden Darstellung und im Anhang B (Abb. B.3 bis B.6) qualitativ deutlich zu erkennen.

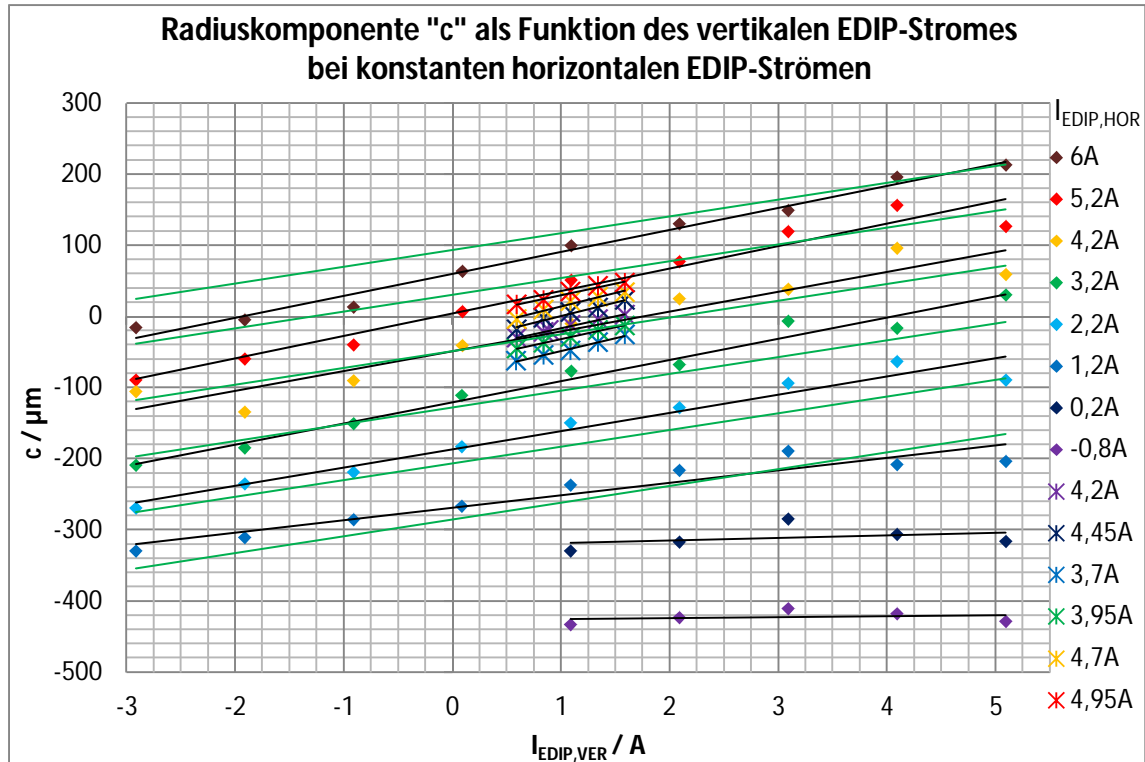


Abb. 4.1: Gemessene Radiuskomponente c dargestellt über den vertikalen EDIP-Strom. Strom des horizontalen EDIP ist jeweils konstant. Trendlinien der einzelnen Reihen in schwarz. Modelltrends in grün. Linearer Trend der Messreihen liegt vor. Gradienten befinden sich in der gleichen Größenordnung der Modelltrends. Die Steigungen der Messdaten bei $I_{EDIP,HOR} = 0,2$ A und $0,8$ A weichen stark vom Modelltrend ab. Darstellung der Messwerte hier nur exemplarisch für die Zuordnung: c über $I_{EDIP,VER}$. Weitere Darstellungen befinden sich im Anhang. Die Messreihen bei $I_{EDIP,HOR} = 0,2$ A und $-0,8$ A sind unvollständig, da EDIP-Kombinationen in diesem Bereich zu Strahlstromverlusten führten. Eine Larmorradiusmessung unter diesem Umstand ist nicht möglich.

Nach dem Modell sind die Steigungen dS_{ver} , dS_{hor} , dC_{ver} und dC_{hor} unabhängig von den Strömen der Korrekturmagnete. Die Steigungen der linearen Regressionen der Messdaten zeigen jedoch eine Auffächerung und damit leichte Abweichungen zur Steigung des Modells. Die Trends der Messreihen mit größeren Strömen zeigen eine höhere Steigung. Mögliche Abhängigkeiten werden in den Abbildungen B.11 und B.12 dargestellt. Eine Beziehung zwischen den Gradienten und den senkrechten Korrekturströmen zeigt sich schwach. Auftretende Abweichungen von Modell-Gradienten betragen im Mittel 20%. Die Berechnung der Determinationskoeffizienten aus allen Messdaten und dem linearen Modell (vgl. Abb. 3.2) liefert Werte von $R^2_c = 0,966$ und $R^2_d = 0,970$.

Die Grundlage des linearen Modells lässt sich in Form einer linearen Transformation beschreiben, die die Bezugsebenen des eingestellten EDIP-Stromes und des Kicks miteinander verknüpft. Trifft dieses Modell zu, lässt sich die Phasenverschiebung zwischen den Bezugsebenen aus der Rotation der Transformation berechnen und darstellen.

Hierzu werden die jeweiligen Phasenwinkel wie folgt berechnet.

$$\text{Für die EDIP-Ströme:} \quad \varphi_I = \arctan\left(\frac{I_{EDIP_{HOR}} - I_{ideal\ EDIP_{HOR}}}{I_{EDIP_{VER}} - I_{ideal\ EDIP_{VER}}}\right) \quad (4.1)$$

$$\text{Für den Kick:} \quad \varphi_{Larmor} = \arctan\left(\frac{c}{d}\right) \quad (4.2)$$

$$\text{Die Phasenverschiebung ergibt:} \quad \Delta\varphi = \varphi_{Larmor} - \varphi_I \quad (4.3)$$

Je nach Vorzeichen der Komponenten müssen für diese Berechnung Vielfache von π beaufschlagt werden, um den tatsächlichen Phasenbezug widerzugeben.

Die Rotation der linearen Transformation ist nach dem Modell konstant. Deshalb werden die berechneten Phasenverschiebungen über alle Messreihen dargestellt (Abb. B.16). Über weite Teile verhält sich die Phasenverschiebung konstant und befindet sich im Mittel bei $\overline{\Delta\varphi} = 24,5^\circ$ mit einer Standardabweichung von $\sigma_p = 10,1^\circ$. Dem Wert von $\overline{\Delta\varphi}$ wird keine weitere Bedeutung beigemessen. Lediglich die Konstanz steht im Vordergrund und kann mit der angegebenen Standardabweichung über weite Teile bestätigt werden.

Der Einbruch der Messdaten wird näher in Abb. B.17 in der Darstellung der Phasenverschiebung über das EDIP-Feld betrachtet. Nahe der idealen EDIP-Kombination verhalten sich die Winkel im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Mit zunehmender Distanz treten erkennbare Verschiebungen bis auf $\Delta\varphi = 0^\circ$ auf. Eine Abhängigkeit der Phasenverschiebung mit der EDIP-Kombination ist damit nicht ausgeschlossen, kann jedoch nicht näher charakterisiert werden.

4.2.1 Markante Messdaten aus der Prüfung des linearen Modells

Abbildung 4.2 zeigt einige ausgewählte Messreihen, die signifikante Auffälligkeiten besitzen und damit dem linearen Modell widersprechen.

An den Messgrenzen einiger Messreihen fallen systematische Ausreißer auf, die stark vom linearen Trend mit ähnlichen Größenordnungen abweichen.

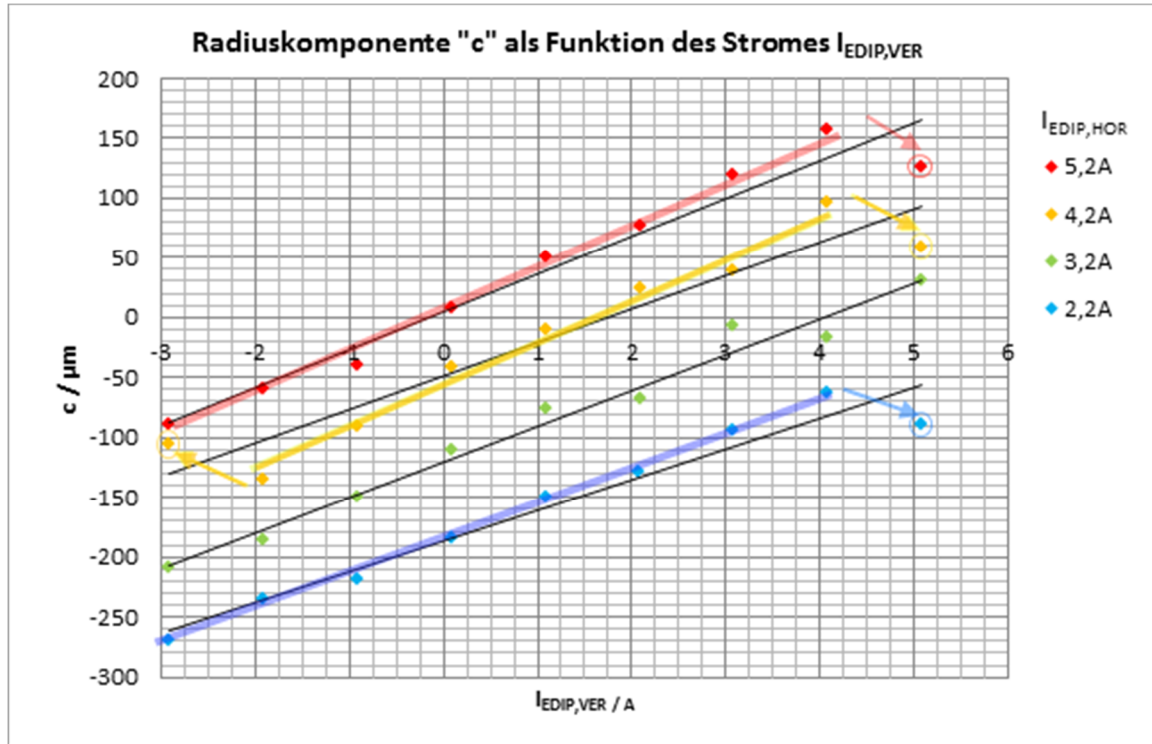


Abb. 4.2: Ausgewählte Messreihen mit deutlichen Abweichungen. Auszug aus Daten, siehe Abb. 4.1. Sprung der auffälligen Datenwerte durch Pfeile hervorgehoben. Trendverlauf ohne Auffälligkeiten entsprechend farblich dargestellt.

Eine Untersuchung der Daten soll die Glaubwürdigkeit der Messpunkte bestimmen. Lassen sich Parameter finden, die auf das Auftreten solcher Auffälligkeiten hindeuten, könnten diese ein Ausschlusskriterium für solche Messpunkte sein. Die Betrachtung des Leckstromes und des Summensignals der BPM können Aufschluss über Strahlstörung oder Verlust geben, welche Gründe für den Ausschluss der Daten sind. Das Summensignal ist proportional zum Strahlstrom.

Die Darstellung des gemittelten Summensignals aller BPM (Abb. B.14) zeigt eine Abhängigkeit des Stromes. Nahe der idealen EDIP-Kombination ist der Strahlstrom am größten und nimmt für weitere Kombinationen kleinere Werte an. Es lässt sich kein auffälliger Werteverlauf bei Strömen um -3 Ampere und 4 – 5 Ampere erkennen.

Der Leckstrom weist in Abbildung B.15 ebenfalls eine Abhängigkeit vom Strom der Korrekturmagnete auf, jedoch liegt keine offensichtliche Korrelation mit der Auffälligkeit vor.

Die dargestellten Messdaten c und d ab Abb. B.3 sind zusammengesetzte Größen zur Reduktion von statistischer Streuung, wie sie in den Gleichungen (3.12) und (3.13) einge-

führt wurden. Die Abweichungen lassen sich jedoch nicht auf nur einen Teil der Zusammensetzung zurückführen, da der Parameter c der x-Koordinate des BPM und der Parameter d der y-Koordinate den gleichen Effekt zeigen (siehe Abb. B.13).

Der Larmorradius als zusammengesetzte Größe aus den Komponenten c und d zeigt keine. Dies wird durch den Determinationskoeffizienten von $R^2 = 0,99$ über alle Messreihen der quadrierten Larmorradien für einen quadratischen Fit bestätigt.

Eine physikalische Ursache wird für die Auffälligkeit in Erwägung gezogen, die die Phase der Larmorrotation beeinflusst, nicht jedoch den Betrag der transversalen Geschwindigkeitskomponente.

Eine Korrelation der großen Phasenänderung fällt nicht auf. Damit ist dieser Effekt zunächst alleinstehend und als Widerspruch der des linearen Modells zu betrachten.

Die Auffälligkeit als spontane Phasenänderung und die großflächige Phasenänderung könnte als Spezialfall der Elektronenstrahlführung auftreten, wenn der Elektronenstrahl durch den kompensierenden Kick über einige Sektionen hinweg Eigenschaften besitzt, die keine phasengleiche Passage des Strahls durch eine Sektion zulassen. Die genannte Bedingung zur phasenrichtigen Passage könnte durch einen veränderten Bahnradius nicht eingehalten werden, wodurch die Phase des Kicks leicht verändert werden würde und der Betrag unverändert bliebe. Der zu kompensierende Gesamtkick wird in der Kühlstrecke gemessen und besteht aus einer Summe von Kicks. Ohne die Kenntnis, wo einzelne störende Kicks auf den Strahl einwirken, kann das Verhalten des erzeugten kompensierenden Kicks bis zur Kompensation des Gesamtkicks ebenfalls nicht bestimmt werden.

Obwohl der Hintergrund der Auffälligkeit unklar ist, werden die auffälligen Messdaten nicht ausgeschlossen, da keine Ausschlussparameter als Kriterium gefunden werden konnten.

4.3 Überprüfung der quadratischen Modelle

Die Regressionskoeffizienten der quadratischen Modelle liegen bei $R^2_{\text{quad}} = 0,988$ für das einfache quadratische Modell und $R^2_{\text{bi-quad}} = 0,995$ für das bi-quadratische Modell. Für den qualitativen Vergleich werden die Quadrate des gemessenen und des modellbasierten Radius in Abb. B.7-B.10 und in der folgenden Darstellung Abb. 4.3 gezeigt. Aus den Abbildungen entnimmt man starke Übereinstimmungen der parabelförmigen Verteilung. Im bi-quadratischen Modell sind die Abweichungen zwischen Modell und gemessenen Radien kleiner als die Abweichungen des einfachen quadratischen Modells.

Auffälligkeiten, die im Vergleich des linearen Modells auftreten, zeigen sich nicht in der Verteilung der Radien.

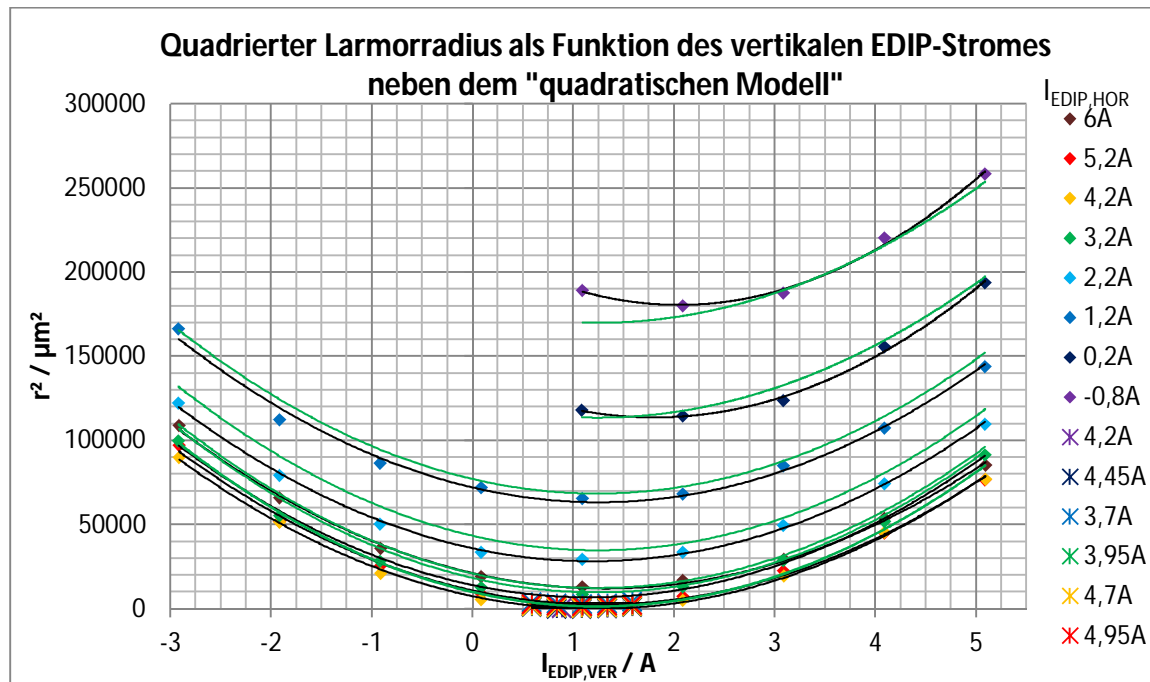


Abb. 4.3: Quadrierte Larmorradien über den vertikalen EDIP-Strom. Horizontaler EDIP-Strom ist jeweils konstant. Quadratischer Trend der einzelnen Reihen in schwarz. „Quadratische Modell“-Trends in grün. Weitere Ergebnisse befinden sich im Anhang ab Abb. B.7.

4.4 Diskussion und Vergleich der Modelle

Die Messergebnisse der Larmorradien und Radiuskomponenten über ein Feld von EDIP-Kombinationen zeigen, dass die einzelnen Modelle zur Beschreibung der Larmorrotationskompensation herangezogen werden können.

Das lineare Modell zeigt durch große Determinationskoeffizienten starke Übereinstimmung mit der Verteilung der Radiuskomponenten.

Ein Auftreten markanter Ausreißer und der Phasenänderungen werden nicht durch das Modell beschrieben und beeinträchtigen die Korrekturrechnung. Eine mögliche Abhängigkeit der Gradienten der Radiuskomponenten von den senkrechten Strömen (z.B.: $dS_{\text{ver}} = f(I_{\text{EDIP,HOR}})$) wird durch das Modell ebenfalls nicht berücksichtigt. Zur Minderung der Auswirkung einer möglichen linearen Abhängigkeit der Gradienten vom jeweils senkrechten Strom müssten die Messpunkte symmetrisch um die ideale EDIP-Kombination angeordnet werden. Dies ist allerdings nicht möglich, da die idealen EDIP-Ströme die gesuchten Größen sind.

Durch die genannten Abweichungen vom linearen Modell verbleiben stets Abweichungen des Ergebnisses von der idealen EDIP-Kombination.

Der Vorteil dieses Modells liegt dennoch in der Ausnutzung der Phaseninformation, die durch die einzelne Betrachtung der Radiuskomponenten erhalten bleibt. Je größer die Anzahl der Messpunkte gewählt wird, desto näher liegt das lineare Modell an den Messdaten und kann durch die entsprechende Korrekturrechnung verwendet werden.

Die quadratischen Modelle konnten ebenfalls verifiziert werden. Der größere Determinationskoeffizient des bi-quadratischen Modells schließt auf unterschiedliche Steigungen des Larmorradius über die jeweiligen EDIP-Ströme. Die Abweichungen der unterschiedlichen Steigungen sind jedoch nicht stark ausgeprägt, deshalb liefert ebenfalls das symmetrische quadratische Modell einen großen Determinationskoeffizienten.

Messwertabweichungen des Larmorradius fließen störend in die Korrekturrechnung ein und haben mit größeren Anzahlen von Messpunkten geringere Auswirkung auf die Rechnung. Für eine geringe Anzahl von Messpunkten ist eine Korrekturrechnung nach dem quadratischen Modell vorzuziehen, da der kleinere Freiheitsgrad des quadratischen Modells Messwertabweichungen früher glättet und die gemessene Verteilung der Larmorradien annähernd symmetrisch linear um die ideale EDIP-Kombination steigt. Für eine exaktere Kompensation ist eine Korrekturrechnung nach dem bi-quadratischen Modell mit vielen Messpunkten geeignet, da diese den Funktionsverlauf des Larmorradius geeigneter nachempfunden.

Ein Vergleich eines Ergebnisses eines quadratischen Modells mit dem des linearen Modells ist zu empfehlen, solange die Güte der Modelle nicht völlig bestimmt ist.

Für eine grobe und schnelle Kompensation der Larmorrotation eignet sich die Korrekturrechnung nach dem linearen Näherungsansatz. Eine Schwäche dieses Verfahrens liegt in der Berechnung der Gradienten. Große Stromänderungen liefern verfälschte Steigungen, während kleine Stromänderungen zu größeren relativen Messwertabweichung führen. Das Verfahren kann zudem nicht in der Nähe der idealen EDIP-Kombination genutzt werden, da einer der Messpunkte zur Gradientenbestimmung den Nullpunkt überspringen kann und damit einen verfälschten Gradienten liefert. Mit typischen Stromänderungen von 1 A ermöglicht diese Berechnung eine zuverlässige Reduktion des Larmorradius ab Anfangsradien von 80 - 100 μm . Das Resultat ist selten kleiner als 40 μm . Diese Werte beruhen auf empirischen Schätzungen und können von der Realität abweichen. Vergleichbar mit der „quadratischen Korrekturrechnung“ geht das verwendete Modell für diesen Näherungsansatz von einer symmetrischen Verteilung der Radien um die ideale EDIP-Kombination aus. Weichen die Gegebenheiten von dieser Art der Verteilung ab, führt dies ebenfalls zu Abweichungen.

5 Realisation, Automatisierung und Ergebnisse

5.1 Automatisierte Kompensation

Ein Korrekturvorgang setzt sich aus einer oder mehreren Iteration von Korrekturschritten zusammen. Pro Iteration werden Larmorradien am und um einen gesetzten Bezugspunkt als EDIP-Kombination gemessen. Eine anschließende Korrekturrechnung, die die aufgenommenen Messdaten nutzt, liefert eine EDIP-Kombination als Ergebnis dieser Iteration. Der Bezugspunkt der nächsten Iteration ist die berechnete EDIP-Kombination. Durch dieses Verfahren wird der Larmorradius mit jeder Iteration kleiner.

Mit der letzten Iteration erhält man das präziseste Ergebnis als ideale EDIP-Kombination, die nach Beendigung des Messvorganges getestet wird. Mit jeder Iteration stehen mehr Daten für eine präzise Berechnung des Ergebnisses zur Verfügung, da die Daten aller vorangegangenen Iterationen für die Korrekturrechnungen verwendet werden können. Die ferngesteuerte Larmorradiusmessung und Einstellung der EDIP-Korrekturmagnete, als essenzieller Bestandteil des Kompensationsvorgangs, wurde in den automatisierten Vorgang eingebunden.

Messwertabweichungen und mögliche Abweichungen zwischen dem Modell und der zugrundeliegenden Physik sind Gründe für ein rein angenähertes Ergebnis der ermittelten idealen EDIP-Kombination. Aus diesem Grund werden alle einzelnen Messpunkte am Ende des Vorganges auf den kleinsten gemessenen Larmorradius untersucht. Wird ein günstigeres Ergebnis als die bereitgestellte Lösung der letzten Iteration gefunden, wird dieses der berechneten Lösung vorgezogen.

Der Ablauf der Larmorradiusmessung und des automatisierten Kompensationsvorgangs können in den folgenden Darstellungen nachvollzogen werden.

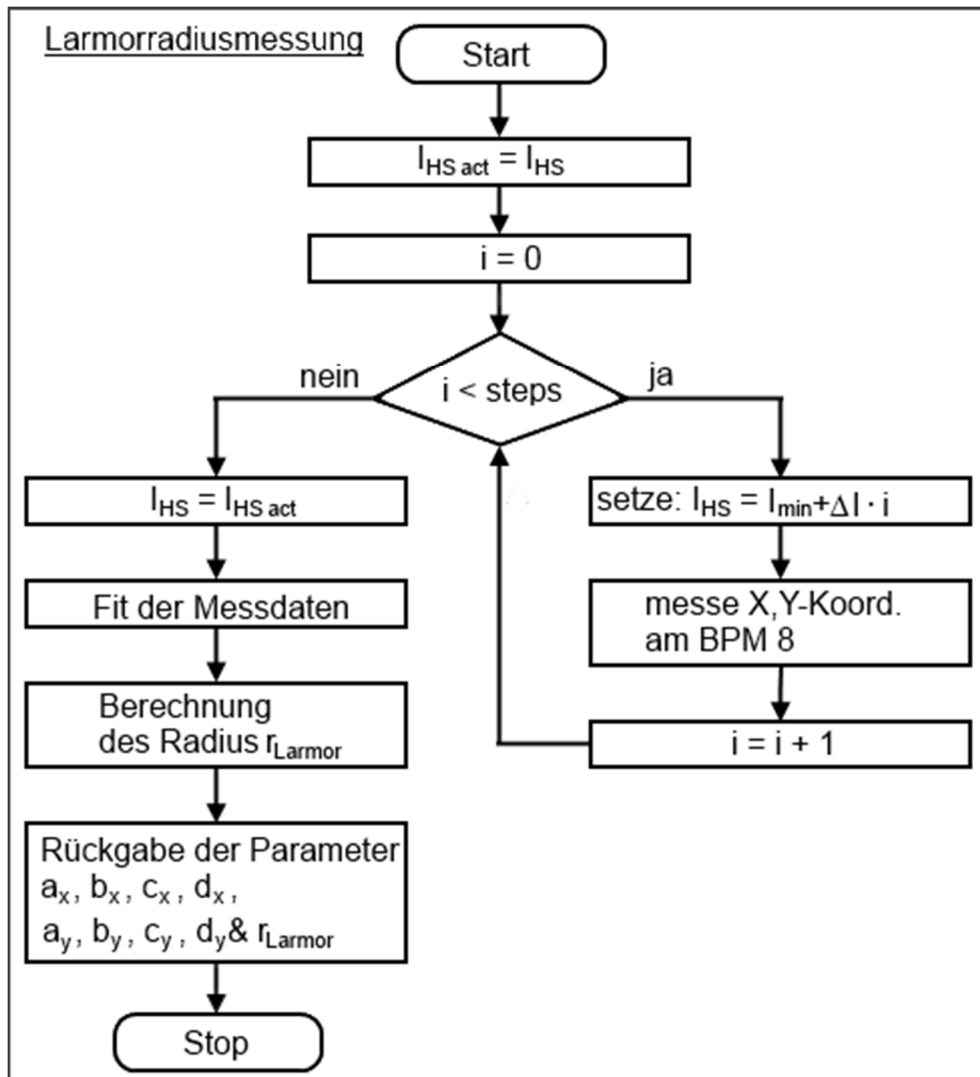


Abb. 5.1: Flussdiagramm der Larmorradiusmessung. Der vereinfachte Ablauf zur Larmorradiusmessung wird gezeigt. Die Schleife entspricht der Messwertaufnahme. Anschließend folgt die Interpretation der Messdaten und Bestimmung des Larmorradius. $I_{HS\ act}$ ist der aktuelle Betriebsstrom des Hauptsolenoids, der für den Elektronenkühler bestimmt wurde. I_{HS} ist ein jeweils eingestellter Strom. i ist der Iterator durch alle Messpunktschritte $steps$. I_{min} , ΔI und $steps$ sind für eine symmetrische Aufnahme von Messdaten um $I_{HS\ act}$ abgestimmt. BPM 8 wird in der Regel ausgelesen, um die Radiusmessung durchzuführen.

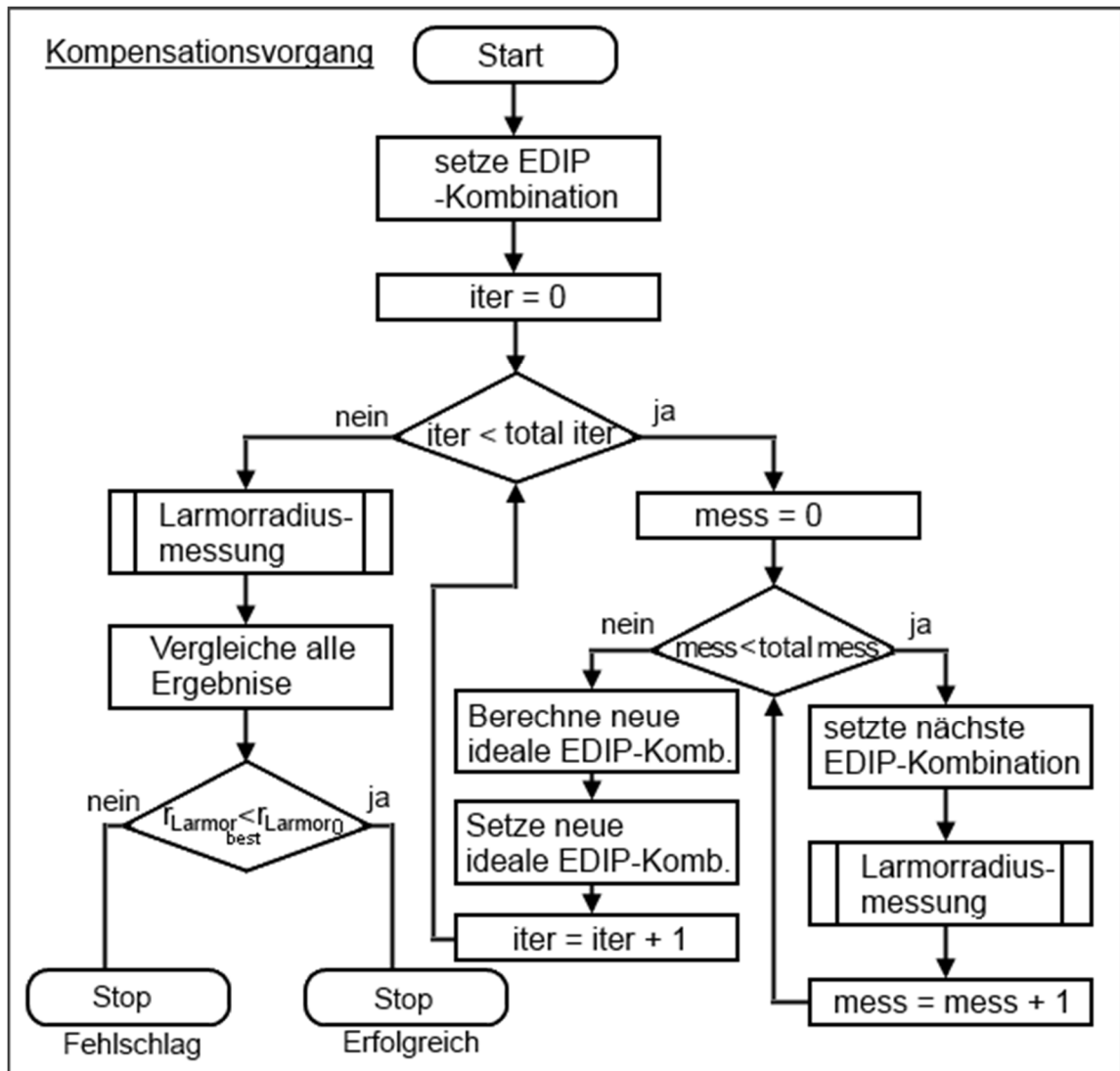


Abb. 5.2: Flussdiagramm eines Kompensationsvorgangs. Das Bild zeigt den vereinfachten Ablauf eines Kompensationsvorgangs. In einer äußeren Schleife (von $iter = 0$ bis $total\ iter$) werden ideale EDIP-Kombinationen bestimmt und als neue Bezugspunkte gesetzt. Die innere Schleife (von $mess = 0$ bis $total\ mess$) liefert die einzelnen Messpunktdaten für die Berechnung der idealen EDIP-Kombinationen. Durch einen Vergleich aller gemessenen Radien kann ein günstigeres Ergebnis gefunden werden. Ist der Larmorradius der günstigsten Einstellung kleiner als der Radius zu Beginn des Vorgangs, war dieser Erfolgreich.

Eine parallele Überwachung der BPM-Summensignale, die proportional zum Strahlstrom sind, deutet auf ungünstige EDIP-Kombinationen, die zum partiellen oder totalen Strahlverlust führen. Dies ist stets zu vermeiden. Der Weg von der zunächst groben und schnellen Minimierung des Larmorradius hin zur Feinen reduziert das Risiko eines Strahlverlust über den Kompensationsvorgang, da die Larmorrotation über den Vorgang hinweg immer günstiger kompensiert wird und damit der Verlust laufend unwahrscheinlicher wird.

In Ausnahmefällen ist der Gesamtkick in der Kühlersektion so groß, dass unrealistische EDIP-Ströme zur Kompensation vorgeschlagen werden. Eine Neujustierung der Hauptmagnetfelder ist an dieser Stelle notwendig.

5.2 Realisation der Softwarelösung und Einbettung in die Infrastruktur des COSY

Die entwickelte Software für die automatisierte Einstellung des Elektronenkühlers wurde in *Java* 1.6 geschrieben und bindet keine externen Bibliotheken ein, um ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Integrität zu gewährleisten. Regressionsberechnungen wurden daher einzeln hergeleitet und in die Software eingebettet.

Die Softwarelösung zur Kompensation der Larmorrotation wird auf dem dedizierten Kühler-PC im Kontrollraum des COSY ausgeführt. Sie kommuniziert als Client über die TCP-Netzwerkschnittstelle mit Serveranwendungen, die auf PCs im COSY-Ring Befehle an die Mess- und Netz-elektronik weiterleiten.

Die Software zur Larmorrotationskompensation deckt alle Funktionen ab, die zur manuellen und automatisierten Kompensation benötigt werden. So ist man in der Lage eine manuelle Messung der vorliegenden Larmorrotation vorzunehmen und diese online auszuwerten. Die Einstellung der EDIP-Korrekturmagnete ist ebenfalls manuell unabhängig von der internen Kontrollstruktur der Korrekturnetzgeräte möglich, um gewählte EDIP-Kombinationen als Messpunkte festzulegen, wie es für die Messung der Larmorradialen über ein Feld von EDIP-Kombinationen durchgeführt wurde. Bis zu 84 Gespeicherte Messungen der Larmorrotation können für alle genannten Korrekturrechnungen verwendet werden.

Die automatisierte Kompensation kann durch unterschiedliche wählbare Korrekturalgorithmen durchgeführt werden. Die Variante „strict“ nimmt feste Werte für die Anzahl der Iterationen und Messpunkte an und führt stets nur die gewählte Korrekturrechnung aus. Die Variante „smart“ verwendet verschiedene Korrekturrechnungen zur schnellen „intelligenten“ Kompensation mit variablen Anzahlen von Messpunkten. So führt anfangs der linearen Näherungsansatz mit drei Messpunkten zu einer schnellen und groben Kompensation, während jede weitere Iteration immer feinere und empfindlichere Korrekturrechnungen verwendet. Dies entspräche zunächst der Verwendung des quadratischen Modells und der anschließenden Verwendung des bi-quadratischen Modells. Der Benutzer wählt bei dieser Variante nur die Zeit, die er für die Kompensation investieren möchte. Eine Schätzung des mindestens erreichten Larmorradius, nach erfolgreichem Abschluss des Verfahrens, wird dafür zusätzlich angegeben.

Das Kompensationsverfahren „indiv“ ermöglicht die individuelle Zusammenstellung der einzelnen Iterationen je nach Art der Korrekturrechnung und Anzahl an Messpunkten, die gespeichert und geladen werden können.

Messungen des Larmorradius und der Vorgang der automatisierten Kompensation werden in eigenen Dateiformaten automatisch mit einem Zeitstempel gespeichert und sind über die Viewer-Funktion des Programms offline einsehbar. Durch die Speicherung im ASCII-Zeichenformat und beigefügten Kommentaren ist das manuelle Einlesen der Dateien ebenfalls möglich.

Eine modulare Funktionalität wurde durch die objektorientierte Software-Architektur erreicht. Sie erlaubt auch zukünftig die einfache und übergreifende Implementierung neuer Funktionen. Der Quellcode des Kernprogramms umschließt ca. 7700 Zeilen und wurde mithilfe der IDE Eclipse (Kepler) geschrieben. Bilder zur Software befinden sich im Anhang C.

5.3 Test und Ergebnis der automatisierten Kompensation

Die entwickelten Algorithmen „strict“, „smart“ und „indiv“ wurden in Simulationen getestet und erwiesen Tauglichkeit. Die Simulation basierte auf Erfahrungen und Daten der Messung der Larmorradien über ein Feld von EDIP-Kombinationen. Die Variante „strict“ konnte zusätzlich in der Praxis getestet werden. Die Ergebnisse des Tests werden folgend präsentiert.

Die Elektronenenergie lag bei 98,5 keV. Aufgrund der gängigen Elektronenkühlereinstellung bei dieser Energie stand die ideale EDIP-Kombination durch das manuelle Kompensationsverfahren bereits mit den Werten $I_{\text{ideal EDIP,VER}} = 1,1 \text{ A}$ und $I_{\text{ideal EDIP,HOR}} = 4,2 \text{ A}$ fest. Der Larmorradius bei dieser EDIP-Kombination beträgt $r_{\text{Larmor}} = 16 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Das Ziel des automatisierten Kompensationsvorgangs ist die Ermittlung einer idealen EDIP-Kombination in der Nähe der gegebenen Werte und damit ein kleiner Larmorradius.

Eine Larmorrotation wurde durch die EDIP-Kombination (0,0) erzeugt, die von der Softwarelösung kompensieren werden soll. Der Anfangslarmorradius betrug $379 \mu\text{m}$, wie die folgende Darstellung Abbildung 5.3 und die Tabelle 5.1 zeigen. Es wurde ein Ablauf in 2 Iterationen mit jeweils 5 Messpunkten und die Verwendung der Korrekturrechnung nach dem quadratischen Modell gewählt.

Die folgenden Messpunkte nach der Larmorradiusmessung am Bezugspunkt liegen nacheinander jeweils um 1 A in die positive und negative Richtung für den horizontalen und den vertikalen EDIP-Strom verschoben. Durch die zusätzliche lineare Orbitverschiebung in Abhängigkeit von den EDIP-Strömen zeigt jede Iteration eine kreuzförmige Anordnung mit dem Bezugspunkt in der Mitte. In Abbildung 5.3 ist eine deutliche Reduktion des Larmorradius zu erkennen. Messreihe 11) zeigt den erfolgreichen Test des Kompensationsvorgangs nach allen Iterationen. Neben geringen Schwankungen durch einen verbleibenden Radius zeigt die Messreihe eine lineare Verschiebung über den erhöhten Hauptsolenoidstrom.

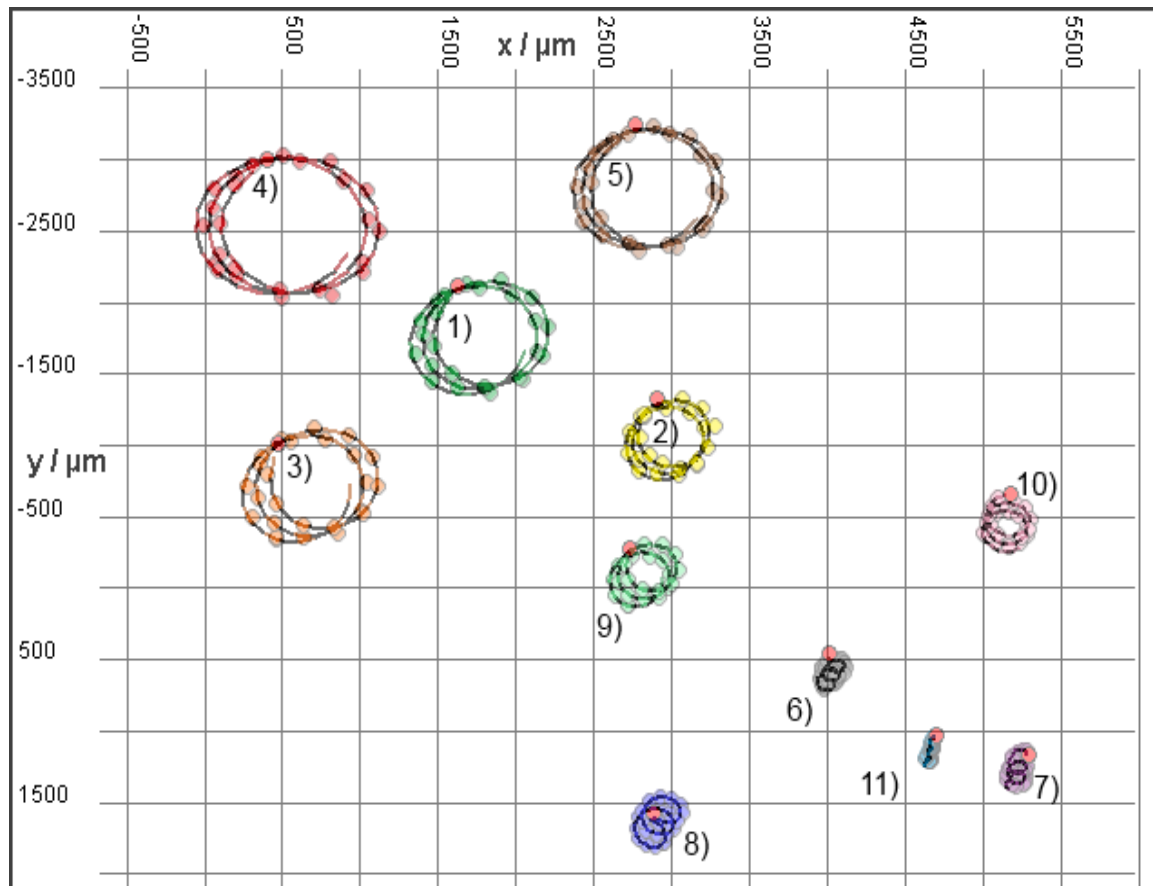


Abb. 5.3: XY-Darstellung der Larmorradiusmessungen des Kompensationsvorgangs. Messdaten und Fits der Larmorradiusmessung mit Angabe der Messreihenfolge. Das Resultat des Verfahrens wird in Messung 11) durch den kleinsten Radius gezeigt.

Tab. 5.1: Ergebnisse des automatisierten Kompensationsvorgangs in der Variante „strict“

Folge	$I_{EDIP,VER} / A$	$I_{EDIP,HOR} / A$	$r_{Larmor} / \mu m$
1	-0,014	-0,016	379,39
2	-0,028	1,487	242,27
3	1,473	-0,015	364,01
4	-0,028	-1,519	500,44
5	-1,528	-0,016	424,65
6	0,896	3,651	59,11
7	0,897	5,155	57,41
8	2,398	3,652	111,35
9	0,897	2,148	178,09
10	-0,605	3,652	134,25
11	1,07	4,58	11,80

Zeile 6 zeigt das Ergebnis der Korrekturrechnung nach der ersten Iteration. Zeile 11 zeigt das Endergebnis nach 2 Iterationen. Nummerierung ist analog zu Abb. 5.3.

Die nächste Abbildung 5.4 zeigt nur die erste Messung unter den Anfangsbedingungen und die Ergebnisse der beiden Iterationen.

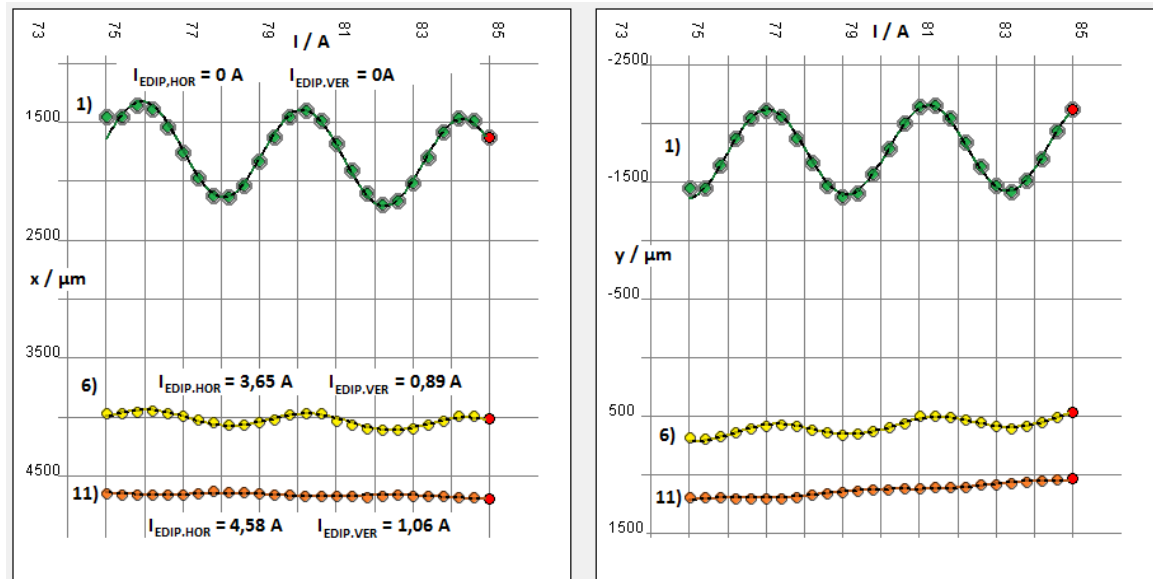


Abb. 5.4: Resultat des Kompensationsverfahrens „strict“. Das Bild zeigt X- und Y-Strahlpositionsverläufe über den Hauptsolenoidstrom. Messreihe 1) zeigt den Larmorradius im Anfangszustand mit angegebenen Strömen der Korrekturmagnete. Messreihe 6) zeigt die Larmorradiusmessung beim berechneten Bezugspunkt nach der ersten Iteration. Messreihe 11) zeigt den Test der letzten Korrekturrechnung und ist damit das Resultat des Kompensationsvorgangs.

Die Dauer des gesamten Kompensationsvorgangs betrug 8 Minuten. Das Verfahren zeigt nach jeder Iteration die erwartete Reduktion des Larmorradius.

Die gefundene ideale EDIP-Kombination der Software liegt mit absoluten Abweichungen von weniger als 10% an der bekannten EDIP-Kombination. Der erreichte Larmorradius des automatisierten Vorgangs ist 28 % kleiner als der Radius der Voreinstellung. Die Abweichung der Ströme ist mit der veränderten und günstigeren EDIP-Kombination zu erklären. Durch Erreichen einer günstigeren EDIP-Kombination im Vergleich zur Voreinstellung, kann der Test des Vorgangs „strict“ der Softwarelösung als erfolgreich betrachtet werden.

Ausgiebige Tests der Variante „strict“ bei veränderten Bedingungen und Einstellungen, Tests der Varianten „smart“ und „indiv“ und ein Vergleich der Algorithmen steht noch aus.

Abbildung 5.4 zeigt neben der erfolgreichen Kompensation eine Orbitverschiebung des Elektronenstrahls durch die veränderte Einstellung der EDIP-Korrekturmagnete. Die Verschiebung zwischen der Strahllage zur Anfangsbedingung und beim Resultat des Kompensationsvorgangs beträgt jeweils ca. 3 mm in X- und Y-Richtung. Die Verschiebung ist durch eine Neueinstellung weiterer Korrekturmagnetströme rückgängig zu machen.

5.4 Automatisierte Einstellung der Hauptmagnete nach der Elektronenenergie

Die magnetische Führung des Elektronenstrahls erfordert eine feine und genaue Einstellung. Über die gesamte Strecke dient die magnetische Führung der Erhaltung der Strahlqualität. In den Biegesektionen liegt eine erzwungene Larmorrotation um die Hauptachse der Sektion vor, die sich nach der Passage aufhebt. Der Elektronenstrahl gelangt anschließend auf die parallele Bahn des homogenen Magnetfeldes der nächsten Sektion. Der phasengleiche Ein- und Austritt aus einer Sektion gelingt jedoch nur wenn eine kleine ganzzahlige Menge von Larmorlängen auf der gebogenen Hauptachse Platz findet [11]. Nach berechneten Tabellenwerten können für alle Sektionen der Elektronenstrahlführung unterschiedliche Anzahlen von Larmorlängen eingestellt werden [6]. Abweichungen führen zur Erzeugung von Kicks beim Durchschreiten der Verbindungsstelle der Sektionen. Die berechneten Tabellen decken nur wenige kinetische Energien der Elektronen ab. Für Elektronenenergien zwischen den berechneten Schritten wird eine $\beta\gamma$ -Skalierung benötigt, um die Hauptmagnete einzustellen. Die magnetische Induktion wird entsprechend des Impulses der Teilchen, zur Erfüllung der Bedingung, eingestellt. Der Impuls eines Teilchens berechnet sich aus:

$$p = c \cdot m_0 \cdot \beta\gamma \quad (5.1)$$

Mit der konstanten Ruhemasse und der Lichtgeschwindigkeit in der Formel sticht $\beta\gamma$ als Skalierfaktor heraus. Das Programm zur automatisierten Einstellung der Ströme der Hauptmagnete berücksichtigt diese Regel und führt zur schnellen und sicheren Berechnung und Übernahme der Stromwerte.

5.5 Untersuchung des Streuverhaltens der BPM

Die Messunsicherheit der BPM ist für die Larmorradiusmessung von entscheidender Bedeutung. Je nach Ausmaß des Streuverhaltens, wird der Fit zur Bestimmung des Larmorradius beeinträchtigt. Im Kernprogramm kann dies durch Mittelung mehrerer Strahlpositionen berücksichtigt werden. Die mehrfache Aufnahme der Strahlposition geschieht jedoch zu Lasten der aufgewandten Messzeit, da die BPM mit einer Integrationszeit von einer halben Sekunde nach jeder Abfrage ruhen.

Die Software wird über den Einfluss auf die Larmorrotationskompensation hinaus Einsatz als Diagnose-Tool finden. Sie ermöglicht die Charakterisierung des Elektronenstrahlorbits und seines zeitlichen Verhaltens und deutet schnell auf Fehleinstellungen.

5.5.1 Software zur Messung des BPM-Streuverhaltens

Das Streuverhalten und der zeitliche Verlauf der Strahlpositionsdaten können mithilfe eines entwickelten Programms gemessen und in Form eines Histogramms oder über eine

Zeitachse dargestellt werden. In Zeitintervallen von mindestens 0,5 Sekunden werden laufend 12 Strahlpositionen des Elektronenkühlers abgefragt und gespeichert. Die Daten können im Laufe der Messung oder offline betrachtet werden.

Der gleitende Mittelwert der aufgenommenen Messdaten kann zur besseren Veranschaulichung des zeitlichen Verhaltens mit variablen Datenfensterbreiten betrachtet werden. Die automatische und manuelle Einstellung des Wertebereichs sowie die variable Wahl eines Zeitfensters erleichtern die Bedienung. Der Mittelwert und die einfache Berechnete Standardabweichung werden für das Zeitfenster direkt angegeben.

5.5.2 Ergebnis der Aufnahme des BPM-Streuverhaltens

Eine Bestimmung der mittleren Streuung durch Ermittlung der einfachen Standardabweichung soll Aufschluss über die Größenordnung der Streuung liefern, um Parameter für einen gelingenden Fit der Larmorradiusmessung entsprechend anzupassen. Die folgende Darstellung zeigt ein Zeitfenster von 20 Minuten einer Langzeitmessung bei unveränderter Einstellung der Elektronenstrahlführung.

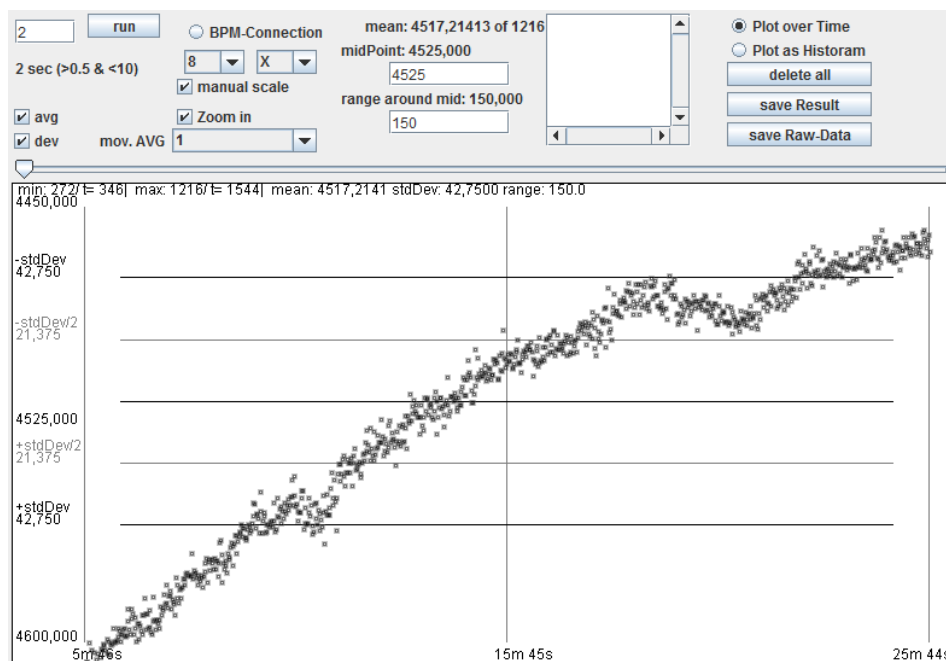


Abb. 5.5: Gemessenes BPM-Streuverhalten. Das Bild zeigt die GUI der Software zur Aufnahme des BPM-Streuverhaltens. Die Werteverteilung wird als Gaußförmig angenommen, während sich der Schwerpunkt driftet. Die Schwerpunktbewegung ist vermutlich ein Resultat der Erwärmung magnetischer Komponenten oder ihrer Netzgeräte. Untersuchungen dieses Verhaltens und ihre Auswirkungen auf die Elektronenstrahlführung folgen. Die Ordinatenachse zeigt die Strahlposition in Mikrometern. Die Abszissenachse ist entsprechend die Zeitachse.

Für die Larmorradiusmessung ist Größe der Standardabweichung innerhalb einer Minute entscheidend. Diese ist im Schnitt für die relevanten $BPM < 7 \mu\text{m}$. Zur Larmorradiusmessung werden 25 Strahlpositionen für den Fit gemessen, bei Larmorradien von häufig bis zu $500 \mu\text{m}$ auf. Insgesamt sind damit die Auswirkungen der Streuung auf die Messung des Larmorradius gering.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Unter dem Aspekt der Automatisierten Einstellung des 2 MeV Elektronenkühlers wurden zwei primäre und ein sekundäres Programm in Java entwickelt.

Das primäre Kernprogramm und Hauptgegenstand dieser Arbeit ist eine Software zur automatisierten Larmorrotationskompensation. Winkelabweichungen des Elektronenstrahls gegenüber den longitudinalen Feldlinien der magnetischen Führung des Elektronenkühlers zwingen den Strahl auf eine spiralförmige Bahn. In dieser Form ist die Kühlung des Ionenstrahls des COSY erheblich beeinträchtigt. Die Winkelabweichungen entstehen durch Kickübermittlungen auf den Elektronenstrahl, die bleibende transversale Geschwindigkeitskomponenten verursachen. Zwei Korrekturmagnete werden durch die Software zur Erzeugung eines Gegenkicks verwendet, der den Gesamtkick kompensiert. Die automatisierte Messung des Larmorradius, die Steuerung der verwendeten Netzgeräte und Berechnungsvorgänge sind in das Kernprogramm integriert. Damit wird ein automatisierter

Kompensationsvorgang mit geringer Benutzerbindung gewährleistet.

Die vorhandene Korrekturrechnung der Ströme wurde überarbeitet und mit zusätzlichen Berechnungen nach entwickelten Modellen in die Softwarelösung integriert. Der Kompensationsvorgang ist durch die Software manuell sowie automatisiert in verschiedenen Varianten möglich.

Die Aufnahme eines Messpunktes, einer Larmorradiusmessung bei einer gewählten Stromkombination der Korrekturmagnete, dauert bei einer typischen Netzwerklatenz und Programmeinstellungen ca. 40 - 50 Sekunden.

Die entwickelten Modelle benötigen mindestens folgende Anzahlen von verschiedenen Messpunkten für die Berechnung eines zuverlässigen Ergebnisses in einer Iteration:

Lineares Modell: 5

Quadratisches Modell: 6

Bi-Quadratisches Modell: 8

Der lineare Näherungsansatz benötigt stets drei Messpunkte und liefert nur für Larmorradien ab mindestens 80 - 100 μm zuverlässige Ergebnisse.

Für die automatisierte Kompensation wurden mehrere Algorithmen entwickelt. Die Variante "smart" gibt folgende abgeschätzte resultierende Larmorradien bei entsprechendem Zeiteinsatz:

4 Minuten: < 200 μm	12 Minuten: < 10 μm
6 Minuten: < 25 μm	16 Minuten: < 8 μm
8 Minuten: < 20 μm	20 Minuten: < 6 μm

Alle Algorithmen wurden in Simulationen getestet und weisen Tauglichkeit zur Kompensation der Larmorrotation auf. Die Variante "strict" konnte einmalig am Kühler direkt getestet werden. Durch 2 Iterationen mit jeweils 5 Messpunkten konnte ein Larmorradius von 379 μm auf 59 μm nach der ersten Iteration und 12 μm nach der zweiten Iteration reduziert werden.

Das zweite primäre Programm dient der Einstellung der Hauptmagnete entsprechend der Elektronenenergie und wurde bisher nur in einer simulierten Umgebung getestet, da Änderungen der Einstellung an diesen Magneten signifikante Änderungen an der Strahloptik des COSY bedeuten. Der entsprechende betriebstechnische Aufwand ließ einen Test bisher nicht zu.

Durch das sekundäre Programm kann das zeitliche Verhalten und das Streuverhalten der BPM des Elektronenkühlers gemessen werden. Der Einfluss der Messwertstreuung auf die Larmorradiusmessung konnte durch die Software abgeschätzt und als unbedenklich eingestuft werden.

6.2 Ausblick

6.2.1 Kollektorseitige Larmorrotationskompensation

Im Rahmen der Kompensation der Larmorrotation lässt sich das entwickelte Programm mit wenigen Erweiterungen zur Steigerung der Kollektoreffizienz nutzen.

Für ein hohes Maß der Effizienz passiert der Strahl kurz vor dem Ende der Kühlstrecke einen Wien-Filter [14]. Das Einfädeln des Elektronenstrahls in den Filter ist essenziell für eine effektive Rekuperation und wird durch seinen Aufbau räumlich begrenzt. Führt der einlaufende Strahl eine Larmorrotation aus, können Verluste im Wien-Filter durch den größeren effektiven Querschnitt des Strahls entstehen.

Eine kollektorseitige Larmorrotationskompensation kann Verluste minimieren und die Kollektoreffizienz erhöhen. Da der Vorgang analog zur Kompensation in der Kühlstrecke abläuft, sind nur wenige Änderungen der Software nötig, um eine kollektorseitige Optimierung der Elektronenstrahlführung vorzunehmen. Die Dipolmagnete, die für diese kollektorseitige Kompensation zum Einsatz kommen sollen, wurden bereits installiert.

6.2.2 Glättung der magnetischen Übergänge der Strahlführungssektionen

Eine Korrektur der magnetischen Feldlinien würde es ermöglichen, akkumulierte Kicks der Strahlführung zu minimieren. Dazu stehen elektronische Lasten zur Verfügung, die den Magneten der Line17-1 Sektion positiv und negativ belasten können. Änderungen des Stroms sollen die Abweichungen der fehlerbehafteten Sektion ausgleichen, die durch ihre Fertigungstoleranz entstehen. Der Erfolg dieser Maßnahme reduziert den Gesamtkick und vereinfacht die Kompensation der Larmorrotation in der Kühlstrecke.

6.2.3 Orbiteinstellung der Elektronenstrahlführung mit Responsematrizen

Beschleuniger verwenden Orbit-Response-Matrizen zur Einstellung der Lage eines Teilchenstrahls. Dazu wird der Einfluss eines jeden Korrekturmagneten auf die Strahllage über den gesamten Strahlverlauf gemessen und als Wert einer Matrix zugeführt. Die Multiplikation der inversen Matrix mit der gewünschten Strahllage als Spaltenvektor ergibt eine Reihe von Strömen, die zu der gewünschten Strahllage führt.

Da der Elektronenkühler prinzipiell dem Aufbau eines Linearbeschleunigers entspricht kann dieses Verfahren automatisiert gemeinsam mit der Larmorrotationskompensation zu einer vereinfachten Bedienung und einen sicheren Betrieb führen.

Danksagung

Mein Dank gilt besonders meinem institutsseitigem Betreuer Vsevolod Kamerdzhev, der seit Beginn der Arbeit geduldig auf jede meiner Fragen einging und mich zu meinen zukünftigen Lebensschritten motivierte. Sein objektiver und verständnisvoller Blickwinkel half mir stets weiter und wird dies hoffentlich auch noch weiterhin tun.

Meinen Dank möchte ich auch Herrn Hoyler zum Ausdruck bringen, da die Investition der Zeit und Mühe zur Betreuung einer Bachelorarbeit keine Selbstverständlichkeit ist. Für das Korrekturlesen meines Entwurfs und den netten und raschen Kontakt möchte ich mich sehr bedanken.

Ich möchte meinen Dank auch an die Mitarbeiter des IKP-4 richten. Vielen Dank an die Operateure und Techniker des COSY, die mir Messungen am 2 MeV Elektronenkühler im Zuge meiner Modellüberprüfung ermöglichten. Mein Dank gilt im engerem Rahmen Karl Reimers und Christian Böhme für die sinnvollen Korrekturvorschläge und ihre Expertise und ferner auch den Mitarbeitern Maxim Bryzgunov, Vladimir Reva und Vasilii Parkhomchuk des Budker Institute of Nuclear Physics für die gemeinsame Zeit zur Überprüfung meiner Vorstellung zur physikalischen Grundlage und Einblicke in die Parallelen zur Plasmaphysik.

Ich möchte meinem Kommilitonen und Freund Benny Nauschütt für die langen und ausgiebigen Gespräche zur Arbeit und die nötigen ablenkenden Gespräche am Mittagstisch danken.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Freundin Galina für ihre motivierenden Worte und ihre Geduld.

Ich bedanke mich auch bei allen weiteren Menschen, die mir im Rahmen der Bachelorarbeit und darüber hinaus geholfen haben, die hier keine Erwähnung finden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Forschungszentrum Jülich GmbH – Homepage, COSY, http://www.fz-juelich.de/ikp/DE/Forschung/Beschleuniger/_doc/COSY.html, (2014)
- [2] J. Dietrich, “Status of the 2 MeV electron cooler for COSY / HESR”, MOPD067, Proceedings of COOL2013, (2013)
- [3] V. B. Reva, “Commissioning COSY cooler with electron beam at Novosibirsk”, TUPM2HA01, Proceedings of COOL2013, (2013)
- [4] Forschungszentrum Jülich GmbH – Homepage, CANU http://www.fz-juelich.de/ikp/ikp-4/DE/Forschung/Beschleuniger/COSY_CANU.html, (2014)
- [5] G. I. Budker, “Electron cooling and new possibilities in elementary particle physics”, Nuclear Physics Institute, Novosibirsk, Usp. Fiz. Nauk 124, 561-595, (1978)
- [6] M. Bryzgunov, A. Bubley, V. Panasyuk, V. Parkhomchuk, V. Reva, “Matching of magnetic field with energy of electrons in 2 MeV COSY Cooler”, WEPP007, Proceedings of COOL2013, (2013)
- [7] HEPHY, Institut für Hochenergiephysik – Homepage, Teilchenbeschleuniger, <http://www.hephy.at/physik/dietechnik/teilchenbeschleuniger/>, (2014)
- [8] A. Smirnov, “Particle accumulation using Barrier Bucket RF System”, TUM2MCIO02, Proceedings of COOL09, (2009)
- [9] M. Bryzgunov, A. Bubley, A. Ivanov, V. Parkhomchuk, V. Reva, A. Kruchkov, “Electron Gun with Variable Beam Profile for COSY Cooler”, TUBS06, Proceedings of COOL’11, (2011)
- [10] M. Bryzgunov, A. Bubley, V. Chekavinskiy und weitere, “Electron Collector for 2 MeV Electron Cooler for COSY”, TUPS07, Proceedings of COOL’11, (2011)
- [11] M. Bryzgunov, A. Bubley, V. Gosteev und weitere, “Magnetic System of Electron Cooler for COSY”, TUPS10, Proceedings of COOL’11, (2011)
- [12] C. Grossmann, J. Terno: „Numerik der Optimierung“, Teubner Studienbücher, (1997)

- [13] Seite „Optimierung (Mathematik)“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 21. August 2014, 09:30 UTC.
URL:[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimierung_\(Mathematik\)&oldid=133297009](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimierung_(Mathematik)&oldid=133297009) (Abgerufen: 1. September 2014, 14:48 UTC)
- [14] M. Bryzgunov, A. Buble, V. Chekavinskiy, I. Gusev, A. Ivanov, M. Kondaurov, V. Panasyuk, V. Parkhomchuk, D. Pureskin, A. Putnikov, V. Reva, D. Senkov, D. Skorobogatov, “Collector for Electron Cooling System with Suppression of Reflected Electron Flux”, WEPP04, Proceedings of COOL2013, (2013)
- [15] Unterlagen und Dokumente zur manuellen Larmorrotations-kompensation von V. V. Parkhomchuk, Budker Institute of Nuclear Physics für das Forschungszentrum Jülich GmbH

Anhang

Anhang A

Tab. A.1: Messergebnisse der Larmorradiusmessungen über ein Feld von EDIP-Kombinationen

#	I_{EDIP_VER} /A	I_{EDIP_HOR} /A	c_x / μm	d_x / μm	c_y / μm	d_y / μm	c_{neu} / μm	d_{neu} / μm	$\overline{\Delta\varphi}$ (4,4A;1,07A)	r_{Larmor} / μm
1	-2,916	4,202	-103,5	-274,7	-289,0	100,9	-102,2	-281,8	16,90	299,8
2	-1,914	4,201	-133,8	-182,2	-189,2	126,1	-129,9	-185,7	30,93	226,6
3	-0,914	4,201	-88,9	-112,0	-119,9	86,2	-87,5	-116,0	30,97	145,3
4	0,086	4,201	-40,6	-58,7	-62,4	38,3	-39,4	-60,5	20,95	72,3
5	1,088	4,202	-9,9	11,5	8,6	13,3	-11,6	10,1	36,13	15,4
6	2,088	4,200	25,8	70,0	65,3	-17,5	21,6	67,6	29,50	71,0
7	3,089	4,201	38,6	134,2	136,2	-27,3	32,9	135,2	19,65	139,2
8	4,091	4,202	99,7	197,1	190,3	-74,3	87,0	193,7	28,16	212,4
9	5,091	4,202	59,2	273,9	272,6	-35,3	47,3	273,2	12,81	277,3
10	-2,916	5,203	-86,7	-287,9	-314,6	69,4	-78,0	-301,2	25,73	311,2
11	-1,914	5,205	-57,2	-211,0	-232,2	47,3	-52,2	-221,6	28,13	227,7
12	-0,914	5,202	-38,2	-147,7	-164,1	28,0	-33,1	-155,9	33,69	159,4
13	0,086	5,203	6,9	-90,7	-97,9	-10,1	8,5	-94,3	33,63	94,7
14	1,088	5,203	48,5	-24,0	-32,0	-50,1	49,3	-28,0	30,85	56,7
15	2,088	5,204	80,6	39,8	35,9	-72,8	76,7	37,9	25,85	85,5
16	3,088	5,203	123,8	94,9	84,0	-116,8	120,3	89,4	32,00	149,9
17	4,089	5,203	161,8	148,4	152,3	-137,4	149,6	150,3	30,18	212,1
18	5,090	5,204	132,0	257,9	239,8	-110,9	121,5	248,9	14,88	276,9
19	-2,916	6,000	-14,7	-313,4	-346,2	7,1	-10,9	-329,8	23,61	330,0
20	-1,915	6,000	-4,8	-245,6	-267,4	-4,6	-0,1	-256,5	28,03	256,5
21	-0,914	6,000	12,3	-177,0	-199,6	-20,4	16,4	-188,3	33,71	189,0
22	0,086	6,000	60,6	-116,3	-127,9	-67,6	64,1	-122,1	30,51	137,9
23	1,088	6,000	96,1	-54,3	-66,6	-96,7	96,4	-60,5	32,74	113,8
24	2,087	6,000	131,9	-8,3	-15,1	-127,1	129,5	-11,7	37,80	130,0
25	3,089	6,000	154,2	88,9	73,0	-148,4	151,3	81,0	23,66	171,6
26	4,090	6,000	208,8	132,3	113,7	-184,2	196,5	123,0	30,23	231,8
27	5,091	6,000	227,0	213,1	188,5	-196,8	211,9	200,8	24,99	291,9
28	-2,917	3,199	-213,0	-241,4	-240,7	194,9	-204,0	-241,0	23,32	315,8
29	-1,917	3,199	-189,1	-148,1	-145,0	178,7	-183,9	-146,5	29,34	235,2
30	-0,916	3,199	-159,0	-79,0	-77,2	138,4	-148,7	-78,1	30,86	168,0

#	I_{EDIP_VER} /A	I_{EDIP_HOR} /A	c_x / μm	d_x / μm	c_y / μm	d_y / μm	c_{neu} / μm	d_{neu} / μm	$\overline{\Delta\varphi}$ (4,4A;1,07A)	r_{Larmor} / μm
31	0,084	3,199	-112,9	-22,4	-19,1	109,0	-110,9	-20,8	28,49	112,8
32	1,088	3,198	-77,4	49,6	52,4	73,5	-75,4	51,0	33,22	91,1
33	2,087	3,199	-67,2	91,0	89,9	73,5	-70,4	90,4	12,17	114,6
34	3,087	3,198	-6,7	168,5	168,2	21,5	-14,1	168,4	26,26	169,0
35	4,088	3,199	-16,7	224,6	228,9	14,0	-15,4	226,7	18,03	227,3
36	5,089	3,200	30,0	297,6	304,5	-17,8	23,9	301,1	21,33	302,0
37	-2,917	2,197	-276,3	-227,8	-201,5	274,6	-275,5	-214,7	23,01	349,2
38	-1,916	2,197	-237,6	-155,7	-156,3	230,7	-234,2	-156,0	19,76	281,4
39	-0,915	2,197	-221,2	-49,4	-63,3	212,1	-216,7	-56,4	27,29	223,9
40	0,085	2,197	-186,1	5,4	4,6	180,7	-183,4	5,0	25,54	183,5
41	1,087	2,196	-150,0	83,6	86,4	147,3	-148,6	85,0	29,33	171,2
42	2,085	2,198	-124,6	127,0	138,3	128,6	-126,6	132,6	21,71	183,3
43	3,086	2,198	-91,7	196,3	205,2	102,1	-96,9	200,8	21,92	222,9
44	4,087	2,198	-60,4	252,6	274,5	79,7	-70,1	263,6	21,39	272,7
45	5,089	2,199	-87,7	312,0	322,2	101,2	-94,4	317,1	12,27	330,8
46	-1,916	1,195	-306,2	-259,0	-267,5	279,1	-292,7	-263,3	0,89	393,7
47	-1,916	1,195	-328,5	-132,7	-125,0	289,9	-309,2	-128,8	20,24	334,9
48	-0,916	1,195	-289,3	-73,1	-64,7	282,8	-286,0	-68,9	18,13	294,2
49	0,084	1,194	-269,1	27,0	40,1	262,6	-265,9	33,6	24,22	268,0
50	1,087	1,194	-237,8	95,2	108,8	230,9	-234,4	102,0	23,22	255,6
51	2,086	1,197	-211,9	143,7	167,5	206,9	-209,4	155,6	19,08	260,9
52	3,086	1,198	-188,0	219,8	226,8	187,2	-187,6	223,3	17,87	291,6
53	4,088	1,196	-204,4	247,4	259,8	210,3	-207,3	253,6	7,56	327,6
54	5,089	1,196	-202,4	318,0	320,0	208,7	-205,6	319,0	5,87	379,5
55	1,087	0,193	-334,6	98,4	115,2	317,5	-326,1	106,8	17,91	343,1
56	2,085	0,193	-321,4	120,0	128,7	308,6	-315,0	124,4	8,01	338,7
57	3,086	0,194	-285,3	206,9	225,0	269,4	-277,4	215,9	12,36	351,5
58	4,087	0,193	-302,7	245,5	261,1	302,5	-302,6	253,3	4,36	394,6
59	5,089	0,194	-311,2	301,2	326,5	305,8	-308,5	313,9	1,89	440,1
60	1,087	-0,808	-440,0	42,6	64,2	423,3	-431,7	53,4	6,87	434,9
61	2,085	-0,808	-428,8	24,1	50,0	415,9	-422,3	37,1	-5,98	424,0
62	3,086	-0,809	-409,2	136,7	141,1	411,0	-410,1	138,9	-2,41	433,0

#	I_{EDIP_VER} /A	I_{EDIP_HOR} /A	C_x / μm	d_x / μm	C_y / μm	d_y / μm	C_{neu} / μm	d_{neu} / μm	$\overline{\Delta\varphi}$ (4,4A;1,07A)	r_{Larmor} / μm
63	4,088	-0,808	-418,6	214,1	244,5	399,5	-409,1	229,3	-0,75	469,0
64	5,089	-0,808	-436,2	277,3	315,9	387,6	-411,9	296,6	-1,84	507,6
65	0,587	4,201	-29,7	-22,9	-24,1	31,2	-30,5	-23,5	28,71	38,5
66	0,837	4,201	-22,5	-6,4	-6,3	21,4	-22,0	-6,3	31,74	22,9
67	0,887	4,202	-18,6	2,5	-3,3	19,4	-19,0	-0,4	39,78	19,0
68	1,086	4,201	-14,0	10,4	7,2	11,5	-12,8	8,8	30,25	15,5
69	1,337	4,202	-4,3	24,3	24,2	2,5	-3,4	24,2	30,31	24,5
70	1,587	4,202	2,6	40,6	39,8	-0,1	1,3	40,2	24,04	40,2
71	0,587	4,453	-16,9	-27,7	-33,9	14,2	-15,5	-30,8	31,53	34,5
72	0,837	4,453	-1,6	-13,6	-17,0	6,9	-4,2	-15,3	25,36	15,9
73	1,086	4,452	7,3	1,6	-2,7	-3,3	5,3	-0,5	27,52	5,3
74	1,337	4,453	11,7	13,8	15,7	-12,9	12,3	14,7	31,30	19,2
75	1,588	4,452	24,2	30,4	26,9	-21,3	22,8	28,7	34,09	36,6
76	0,586	3,701	-62,6	1,2	-2,1	62,1	-62,4	-0,4	33,81	62,4
77	0,837	3,701	-54,7	12,6	15,6	54,1	-54,4	14,1	32,68	56,2
78	1,087	3,700	-47,6	23,1	22,5	48,5	-48,0	22,8	24,01	53,1
79	1,337	3,701	-38,4	43,1	39,6	34,1	-36,3	41,4	28,20	55,0
80	1,586	3,701	-25,9	61,1	58,4	27,7	-26,8	59,7	29,84	65,5
81	0,587	3,951	-46,8	-12,3	-13,3	44,0	-45,4	-12,8	30,60	47,2
82	0,837	3,951	-37,8	8,0	3,6	36,9	-37,4	5,8	35,66	37,8
83	1,087	3,952	-30,0	18,8	16,1	30,4	-30,2	17,5	27,92	34,9
84	1,337	3,951	-19,5	37,9	35,4	20,7	-20,1	36,7	31,15	41,8
85	1,587	3,951	-12,8	49,1	47,7	15,3	-14,1	48,4	25,49	50,4
86	0,587	4,704	-4,1	-37,9	-43,5	2,9	-3,5	-40,7	36,04	40,8
87	0,837	4,703	8,2	-20,2	-27,2	-11,9	10,1	-23,7	28,24	25,8
88	1,087	4,702	19,3	-6,5	-12,5	-21,6	20,5	-9,5	28,21	22,6
89	1,337	4,703	28,3	6,7	1,6	-27,8	28,1	4,1	34,17	28,4
90	1,588	4,704	34,3	21,0	19,4	-34,6	34,4	20,2	30,23	39,9
91	0,586	4,954	16,0	-47,2	-53,4	-17,3	16,6	-50,3	29,95	53,0
92	0,837	4,954	21,8	-35,2	-40,1	-25,2	23,5	-37,6	34,72	44,4
93	1,087	4,954	34,3	-15,5	-20,4	-32,3	33,3	-17,9	30,07	37,8
94	1,337	4,954	41,9	-4,6	-10,2	-41,8	41,9	-7,4	36,26	42,5

Anhang B

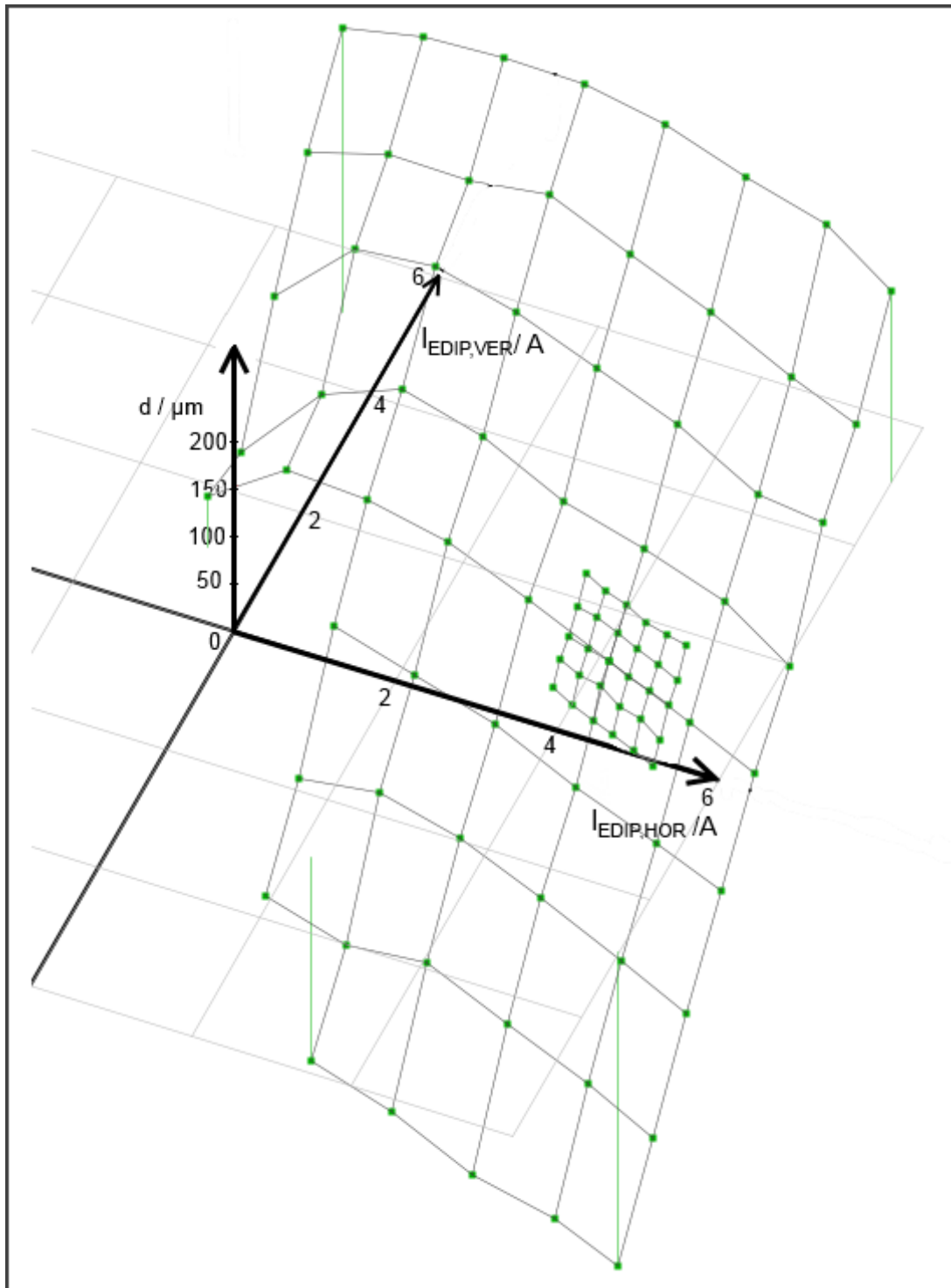


Abb. B.1: Gemessene Radiuskomponenten c über EDIP-Ströme. Die Darstellung zeigt Messdaten der Larmorradiusmessung über eine Schar von EDIP-Kombinationen. Die Radiuskomponente c zeigt ein lineares Verhalten über den Strom der Korrekturmagnete. Die Abbildung ist analog zu Abb. 3.1 zu betrachten. Der gemessene Verlauf entspricht dem linearen Modell. Der Determinationskoeffizient des Verlaufs wurde mit $R^2_c = 0,966$ bestimmt.

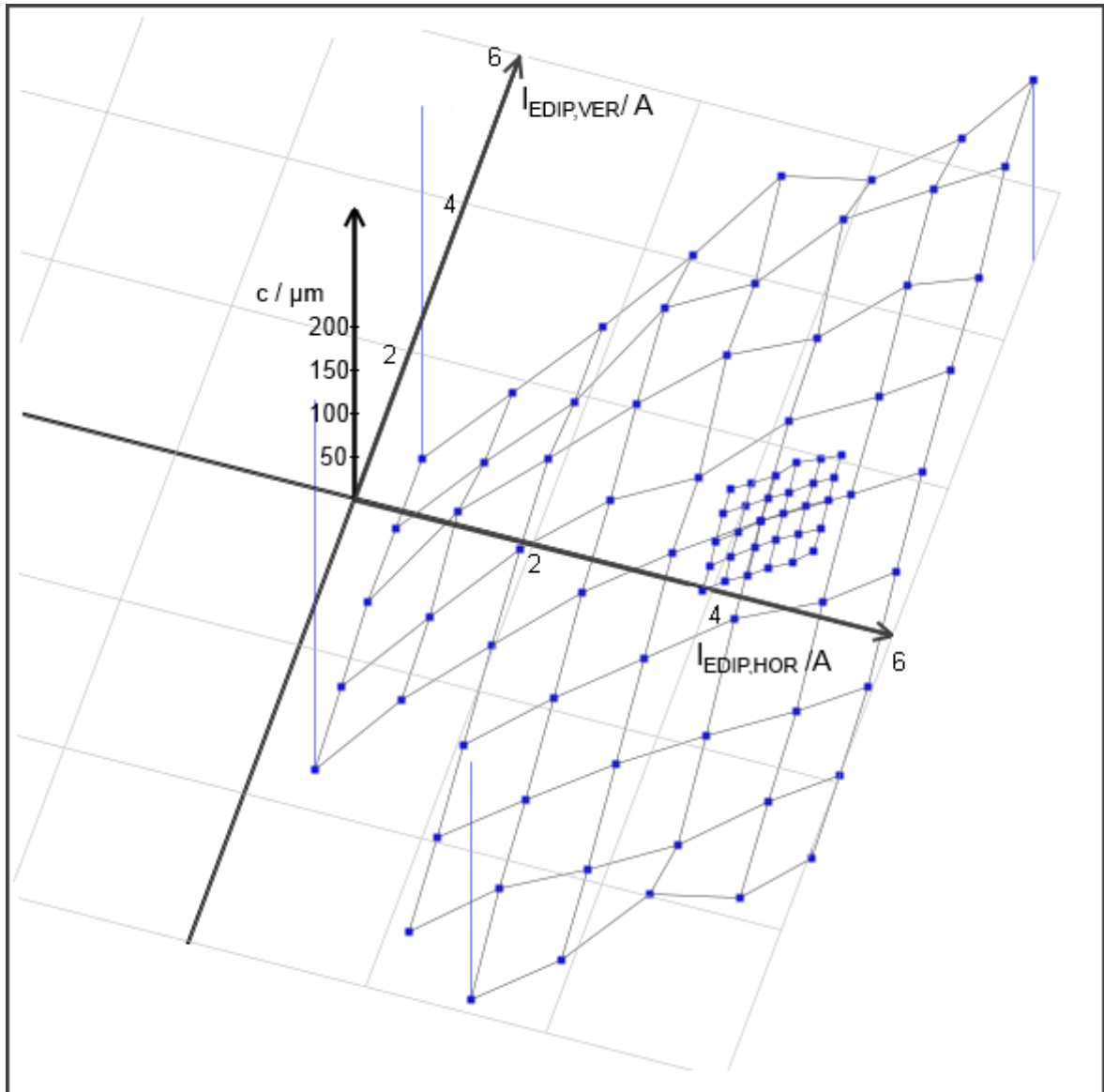


Abb. B.2: Gemessene Radiuskomponenten d über EDIP-Ströme. Diese Darstellung ist analog zu Abb. B.1. Das lineare Verhalten ist hier ebenfalls deutlich zu erkennen. Der Determinationskoeffizient liegt für den Verlauf bei $R^2_d = 0,970$.

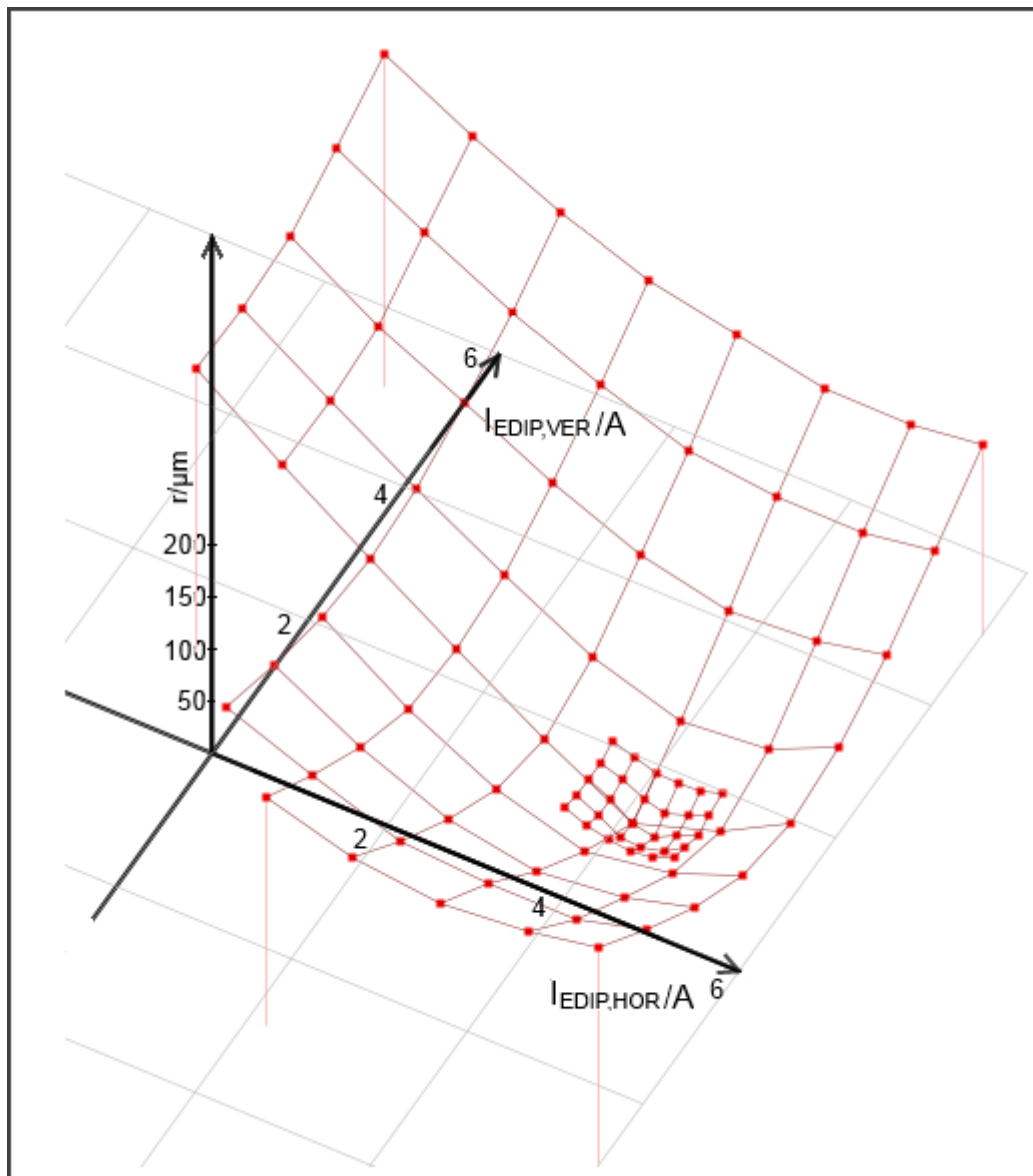


Abb. B.3: Gemessene Larmorradiusverteilung über EDIP-Ströme. Das Bild zeigt die Verteilung der Larmorradien über eine Schar von EDIP-Kombinationen. Sie stimmt mit dem quadratischen Modell überein. Die Abbildung ist analog zu Abb. 3.3 zu betrachten. Ausgehend vom Tiefpunkt der Verteilung steigt der Larmorradius mit ca. $70 \mu\text{m/A}$ an. Die Determinationskoeffizienten betragen $R^2_{\text{quad}} = 0,988$ für das einfache quadratische Modell und $R^2_{\text{bi-quad}} = 0,995$ für das bi-quadratische Modell. Die größere Übereinstimmung des bi-quadratischen Modells schließt auf leicht unterschiedliche Steigungen in $I_{\text{EDIP,VER}}$ - und $I_{\text{EDIP,HOR}}$ -Richtung.

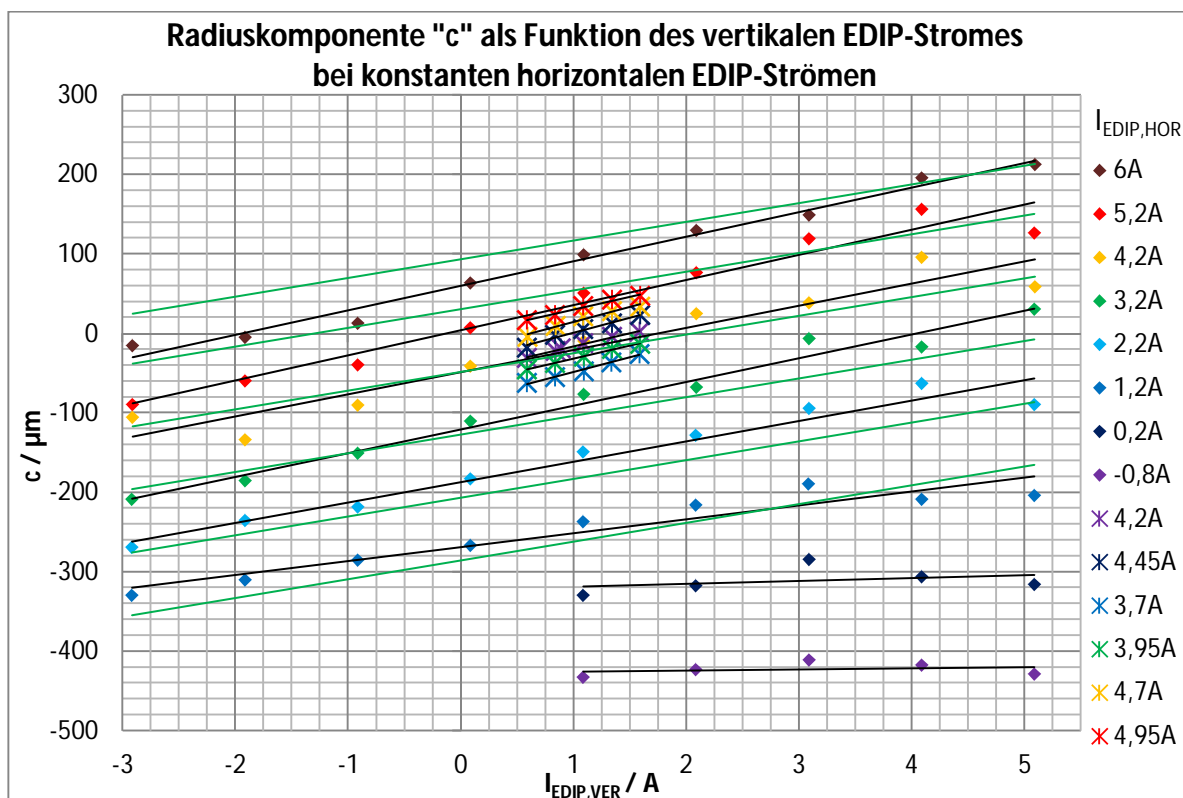


Abb. B.4: Gemessene Radiuskomponente c dargestellt über den vertikalen Strom $I_{EDIP,VER}$. Horizontaler Strom ist jeweils konstant. Trendlinien der einzelnen Reihen in schwarz. Modelltrends in grün. Die Messreihen bei $I_{EDIP,HOR} = 0,2\text{ A}$ und $-0,8\text{ A}$ sind unvollständig, da EDIP-Kombinationen in diesem Bereich zu Strahlstromverlusten führten. Eine Larmorradiusmessung unter diesem Umstand ist nicht möglich.

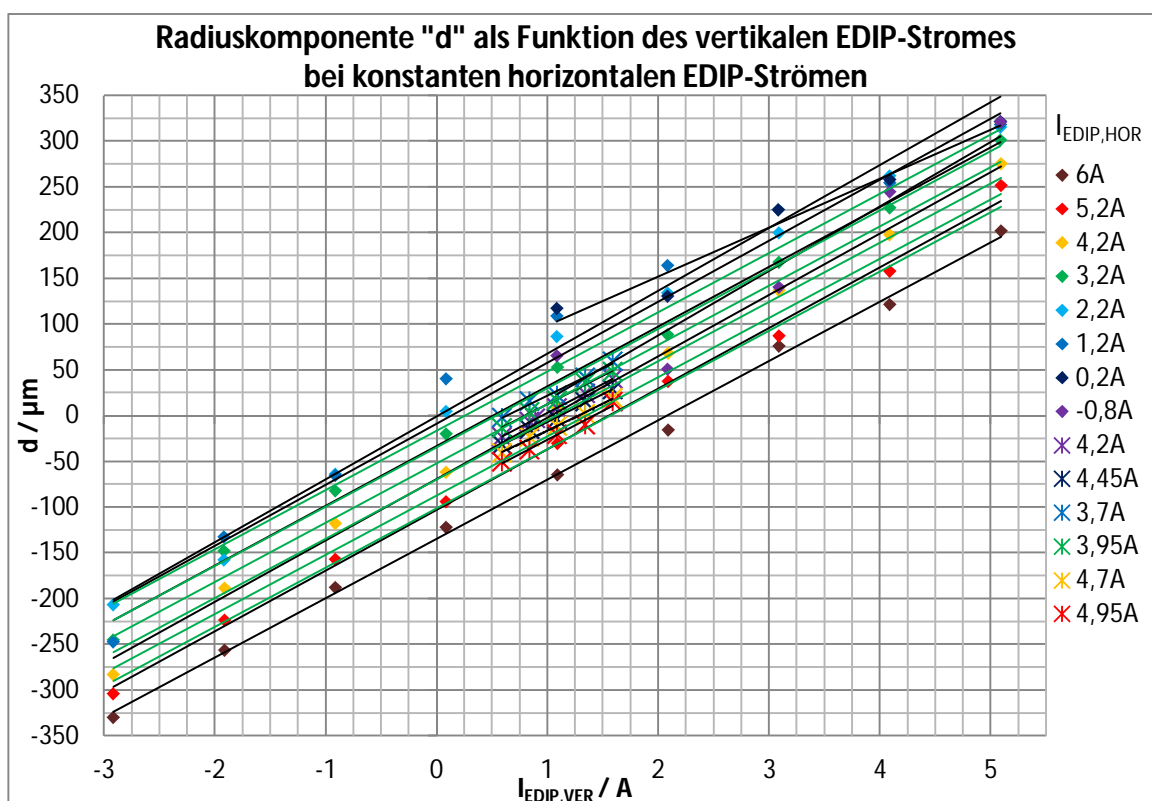


Abb. B.5: Gemessene Radiuskomponente d über $I_{EDIP,VER}$. Analog zu Abbildung B.3.

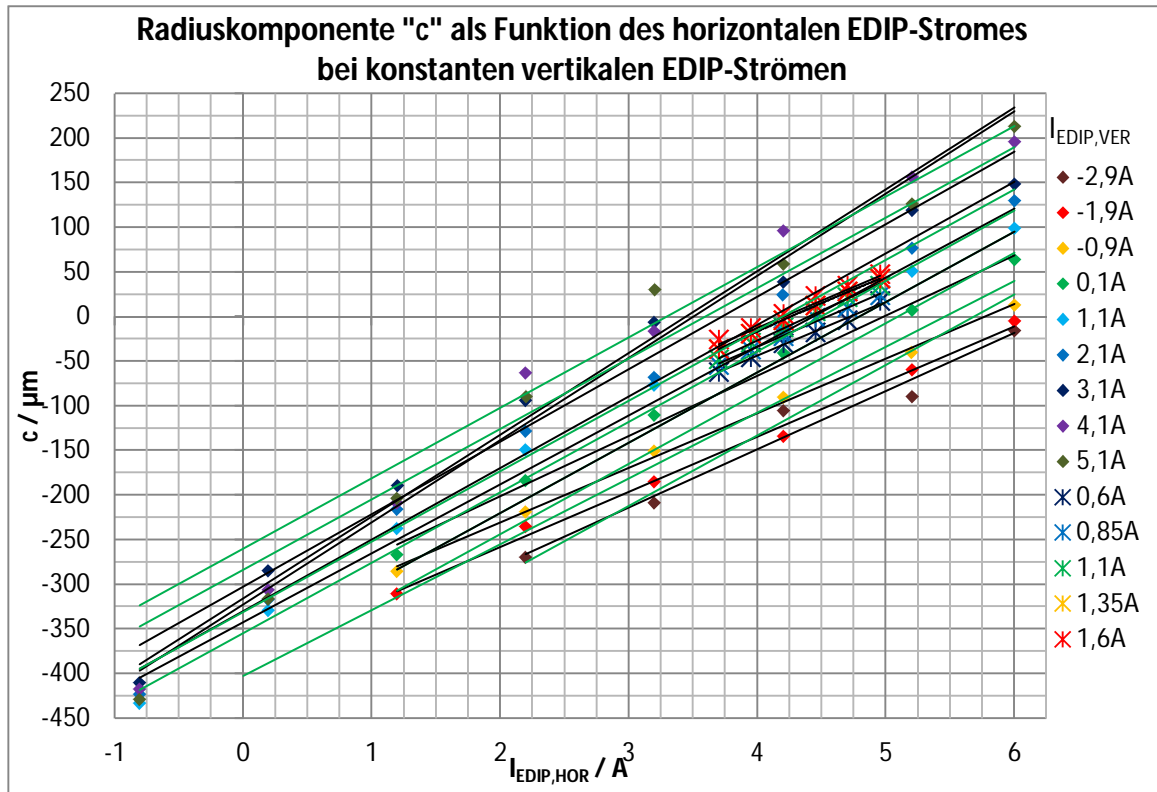


Abb. B.6: Gemessene Radiuskomponente c über $I_{\text{EDIP,HOR}}$.
Analog zu Abbildung B.4.

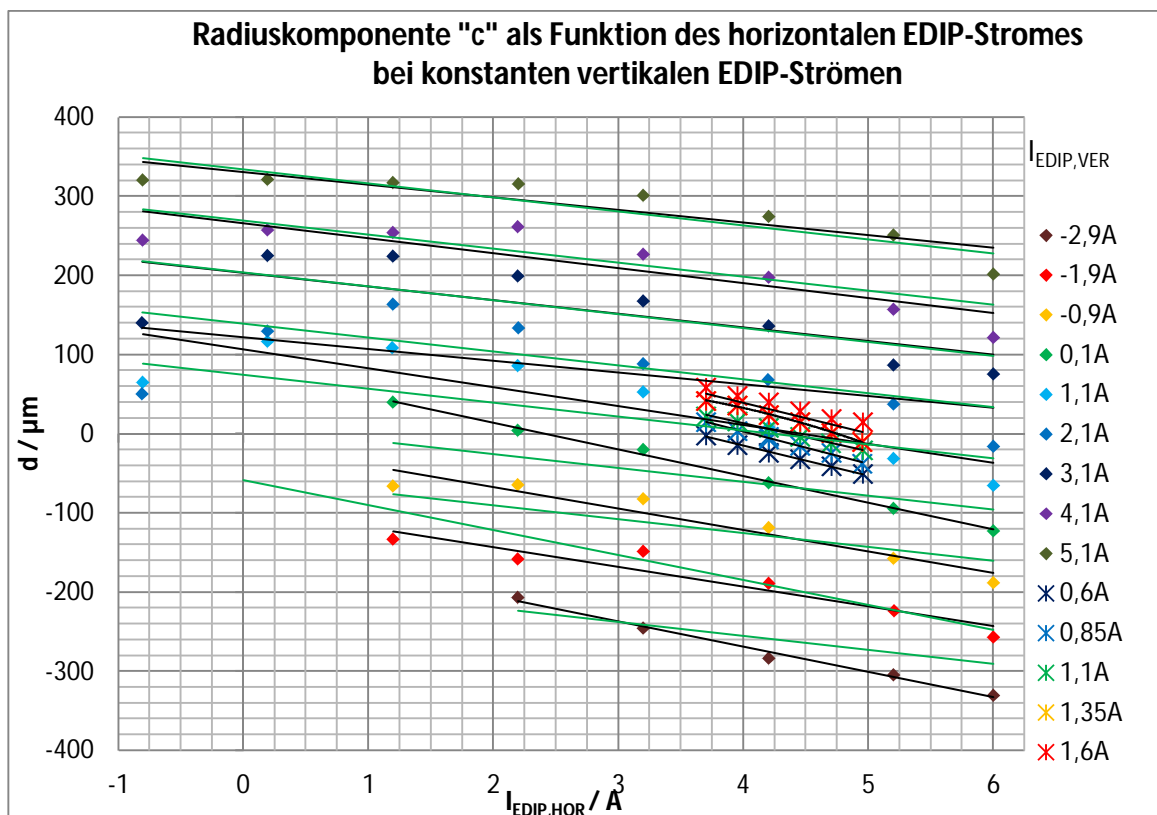


Abb. B.7: Gemessene Radiuskomponente d über $I_{\text{EDIP,HOR}}$.
Analog zu Abb. B.4.

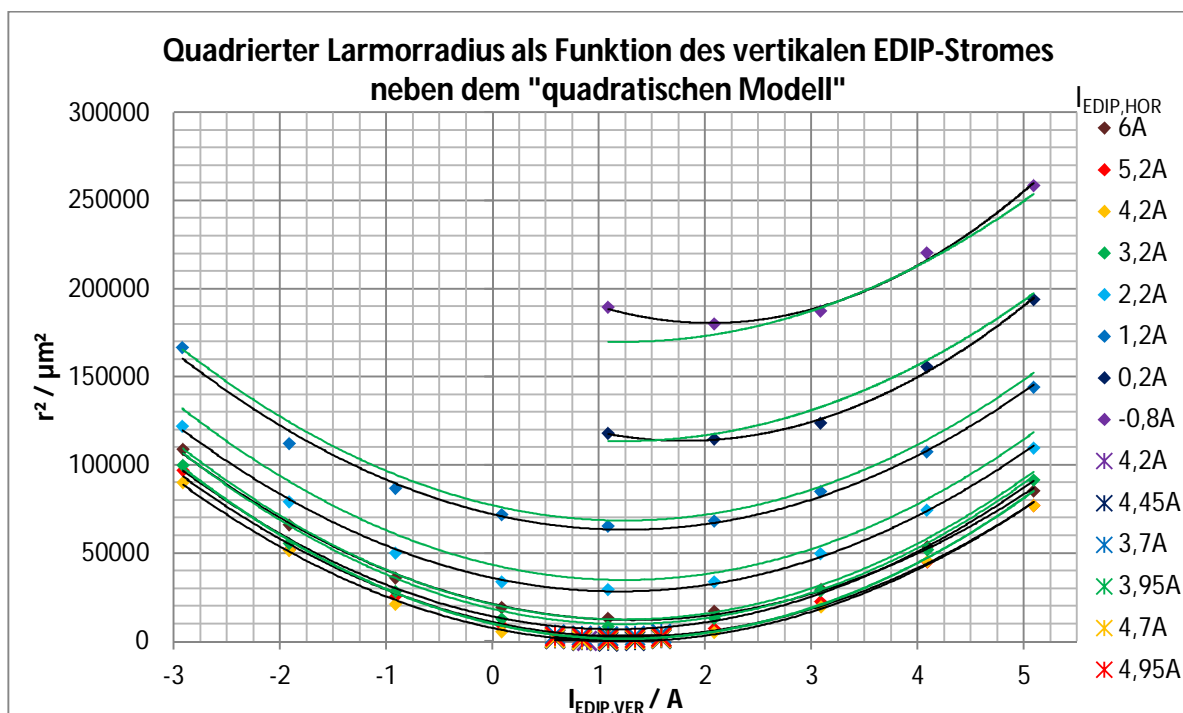


Abb. B.8: Quadrierte Larmorradien dargestellt über den vertikalen Strom $I_{\text{EDIP,VER}}$ mit quadratischem Modell. Horizontaler EDIP-Strom ist jeweils konstant. Quadratischer Trend der einzelnen Reihen in schwarz. „Quadratische Modell“-Trends in grün. Aus diesem Bild fallen ebenfalls die unvollständigen Messreihen bei $I_{\text{EDIP,HOR}} = 0,2\text{A}$ und $-0,8\text{A}$ auf. Strahlstromverluste in diesem Bereich machten Larmorradiusmessungen unmöglich.

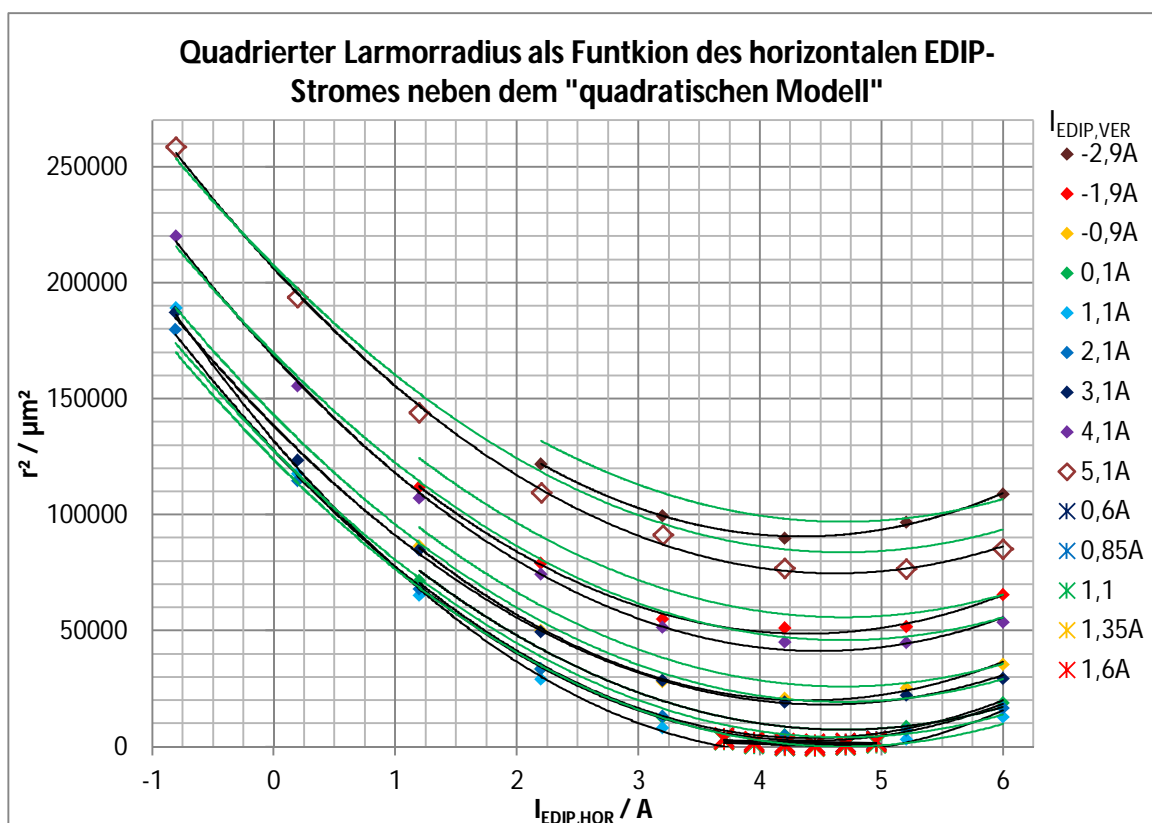


Abb. B.9: Quadrierte Larmorradius über $I_{\text{EDIP,HOR}}$ mit quadratischem Modell. Analog zu Abbildung B.8.

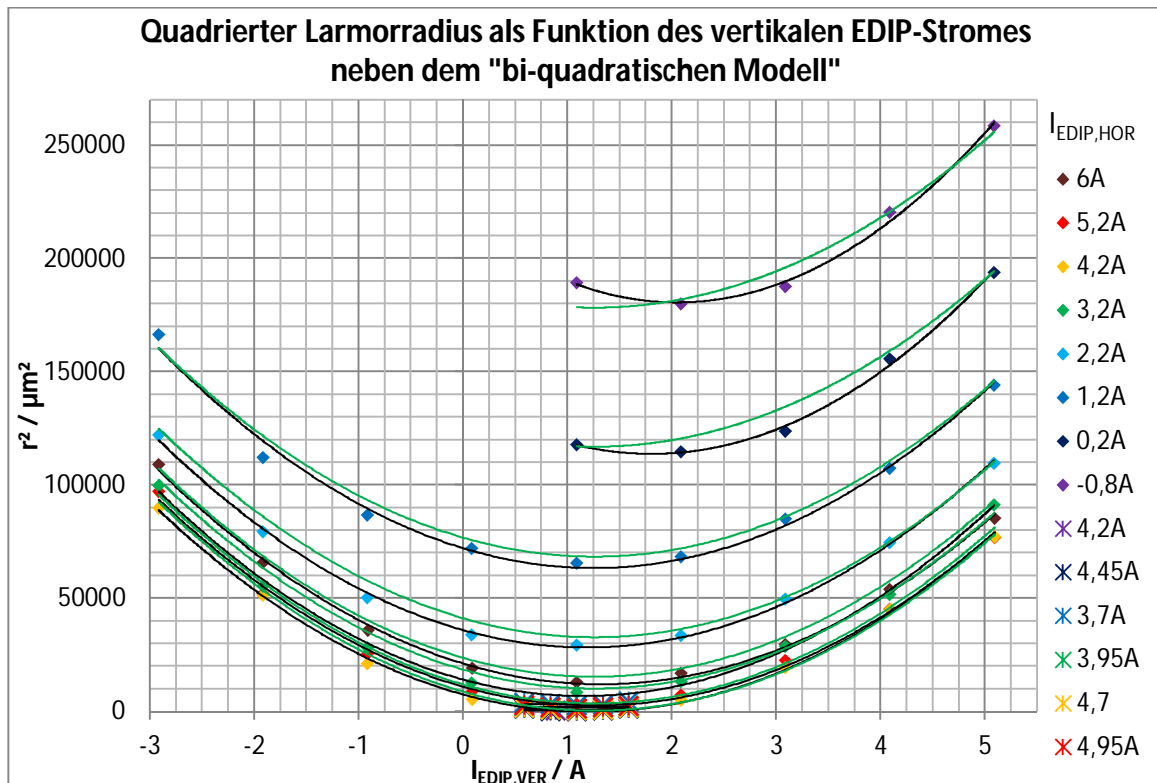


Abb. B.10: Quadrierte Larmorradien über $I_{\text{EDIP,VER}}$. Horizontaler EDIP-Strom ist jeweils konstant. Quadratischer Trend der einzelnen Reihen in schwarz. „Bi-quadratische Modell“-Trends in grün. Unvollständige Messreihen erklärt in Abb. B.8.

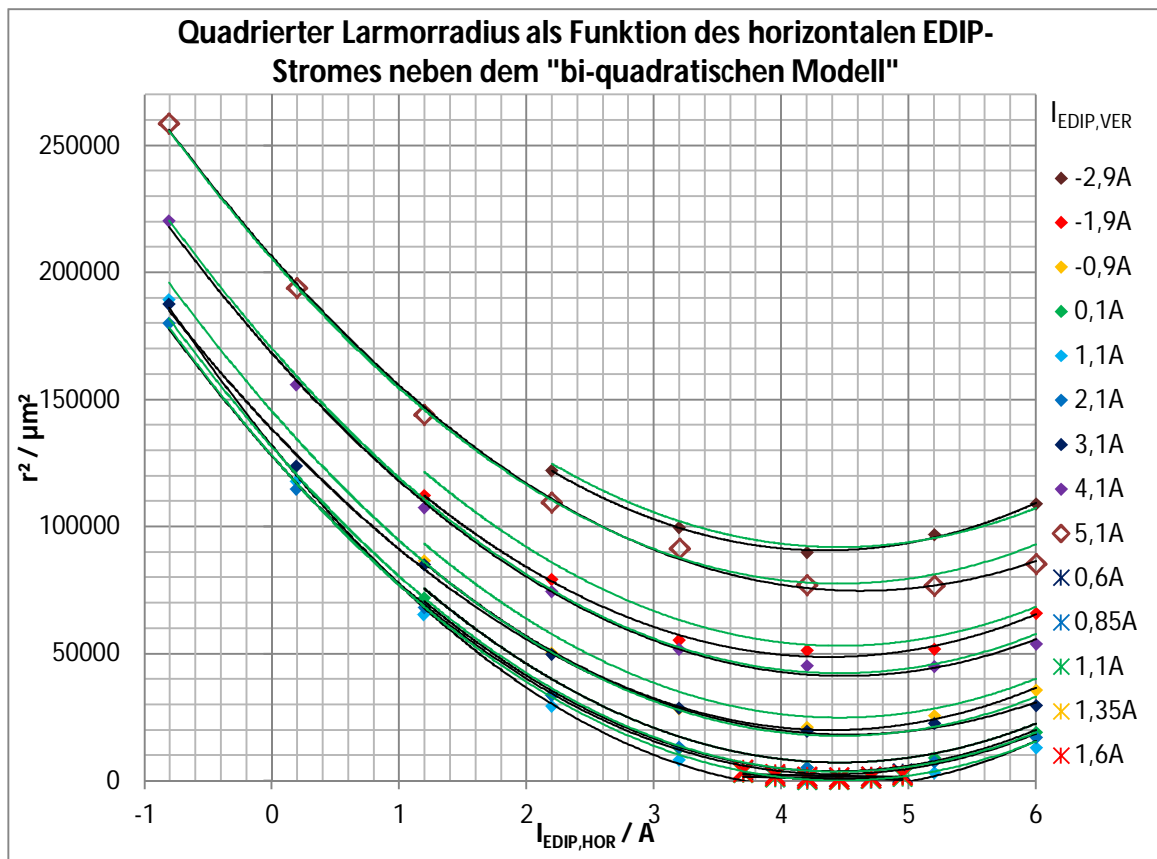


Abb. B.11: Quadrierte Larmorradien über den horizontalen EDIP-Strom. Darstellung analog zu Abb. B.10.

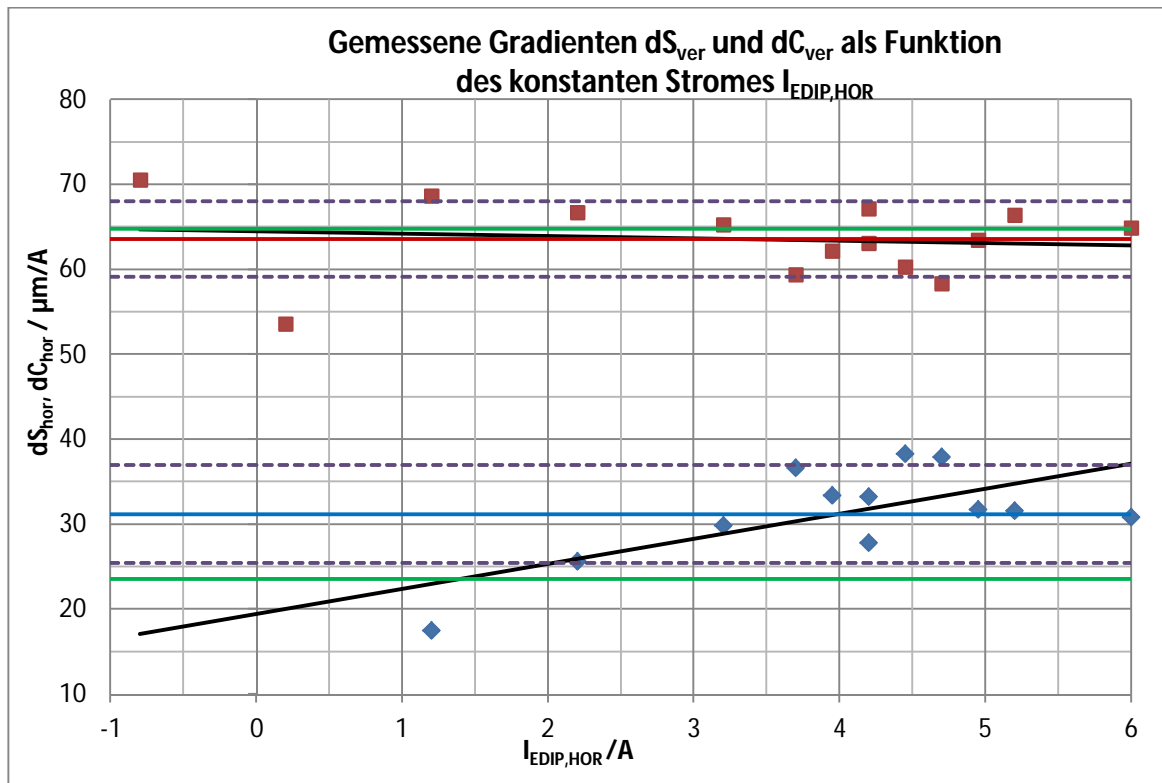


Abb. B.12: Gradienten dS_{ver} (blau) und dC_{ver} (rot) über den konstanten Strom $I_{\text{EDIP,HOR}}$ (siehe Abb. B.4 und B.5). Gerade entsprechender Farbe zeigt Mittelwerte. Bereich zwischen violetten Geraden entspricht der einfachen Standardabweichung der Gradienten. Linearer Trend der Messdaten in Schwarz. Modellbasierte Werte für Gradienten in grün.

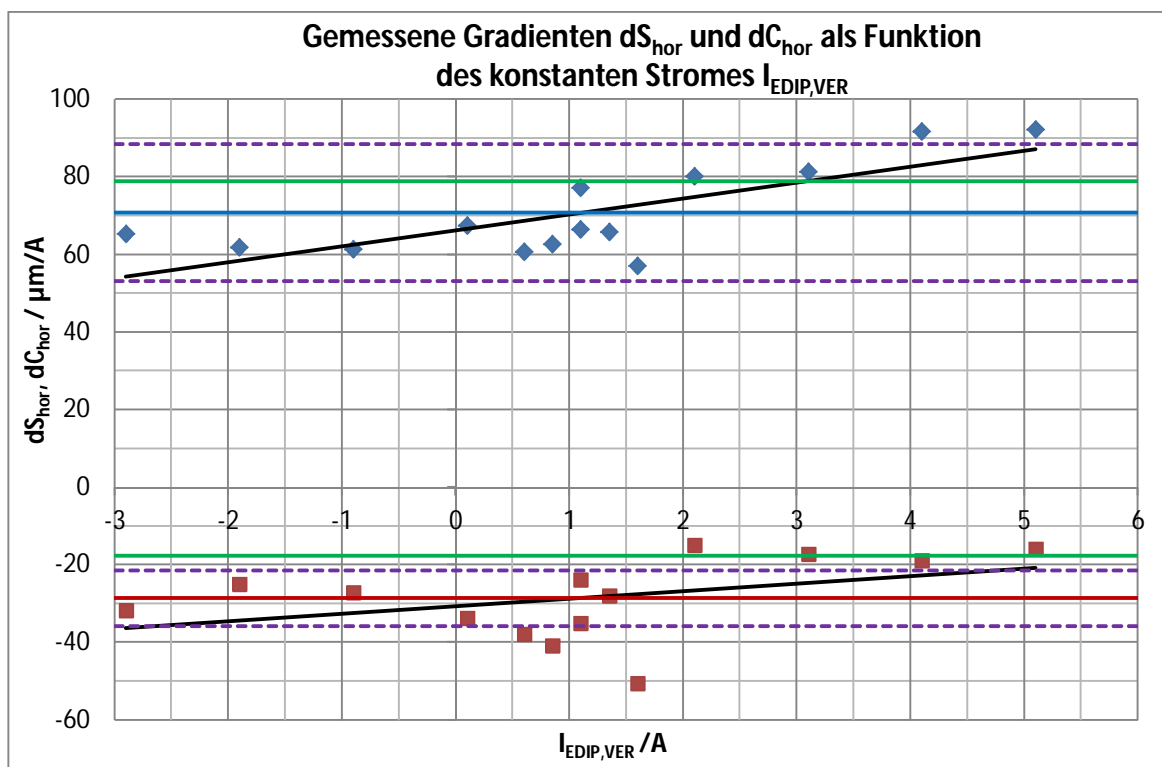


Abb. B.13: Gradienten dS_{hor} (blau) und dC_{hor} über den konstanten Strom $I_{\text{EDIP,VER}}$. Analog zu Abb. B.12.

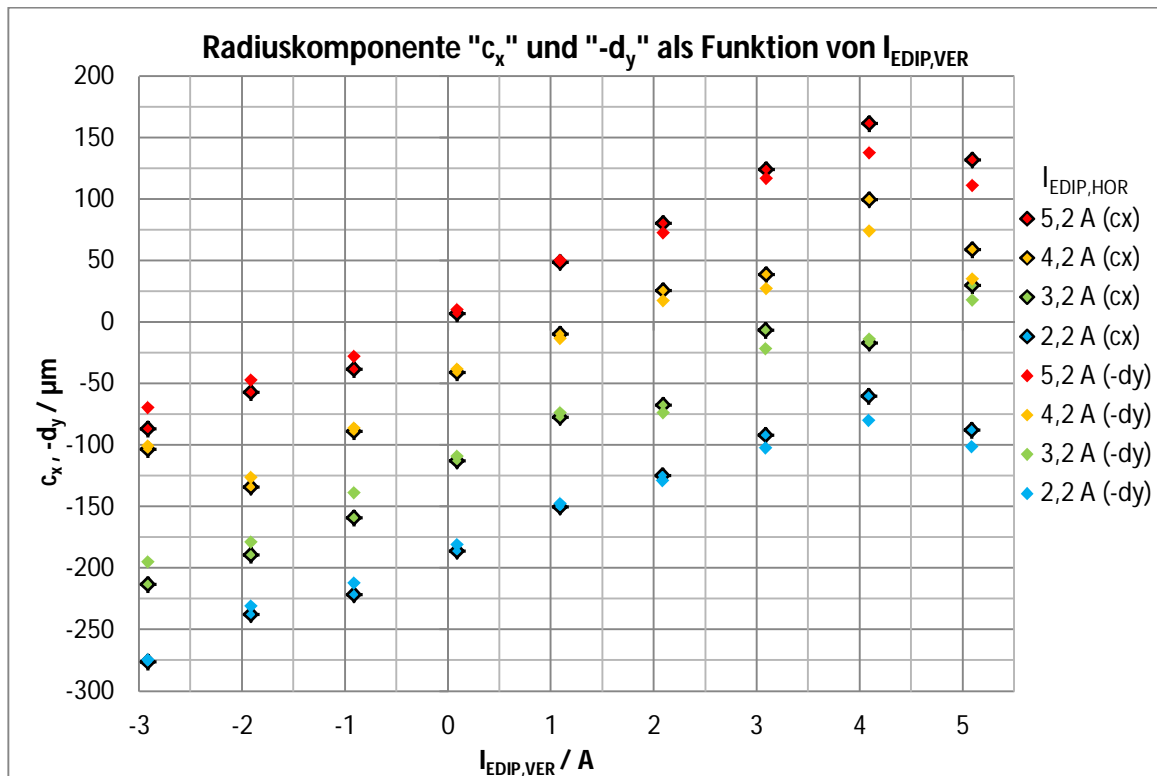


Abb. B.14: Ausgewählte Messreihen mit deutlichen Abweichungen aufgeteilt in die Teile der zusammengesetzten Radiuskomponenten. Analog zu Abb. 4.2. Siehe Gleichung (3.12) und (3.13).

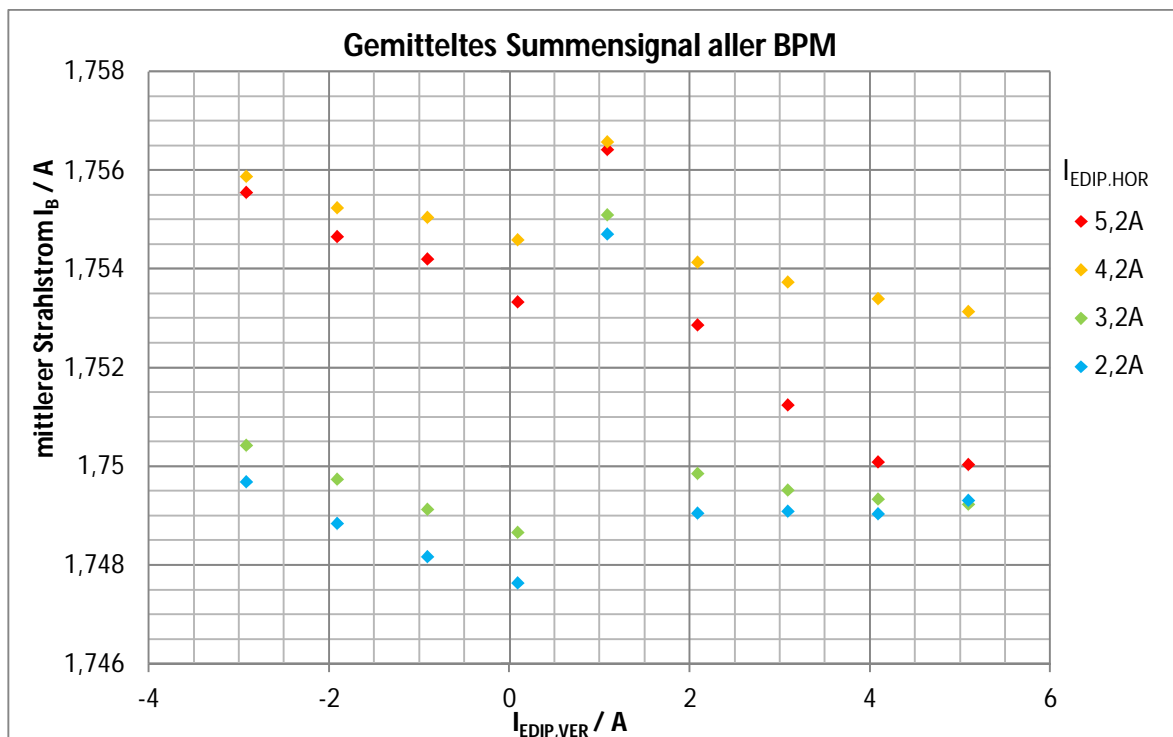


Abb. B.15: Gemitteltetes Summensignal ausgewählter Messreihen mit Auffälligkeiten. Das Summensignal ist proportional zum Strahlstrom. Kleine Kicks, hier erreicht durch Nähe zur idealen EDIP-Kombination ($I_{EDIP,HOR} = 4,2\text{A}$; $I_{EDIP,VER} = 1,1\text{A}$), führen zu den größten Strahlströmen. Eine leichte Ortsabhängigkeit des Strahls wird deutlich. EDIP-Korrekturmagneten verursachen Orbitverschiebungen, die im Summensignal sichtbar werden.

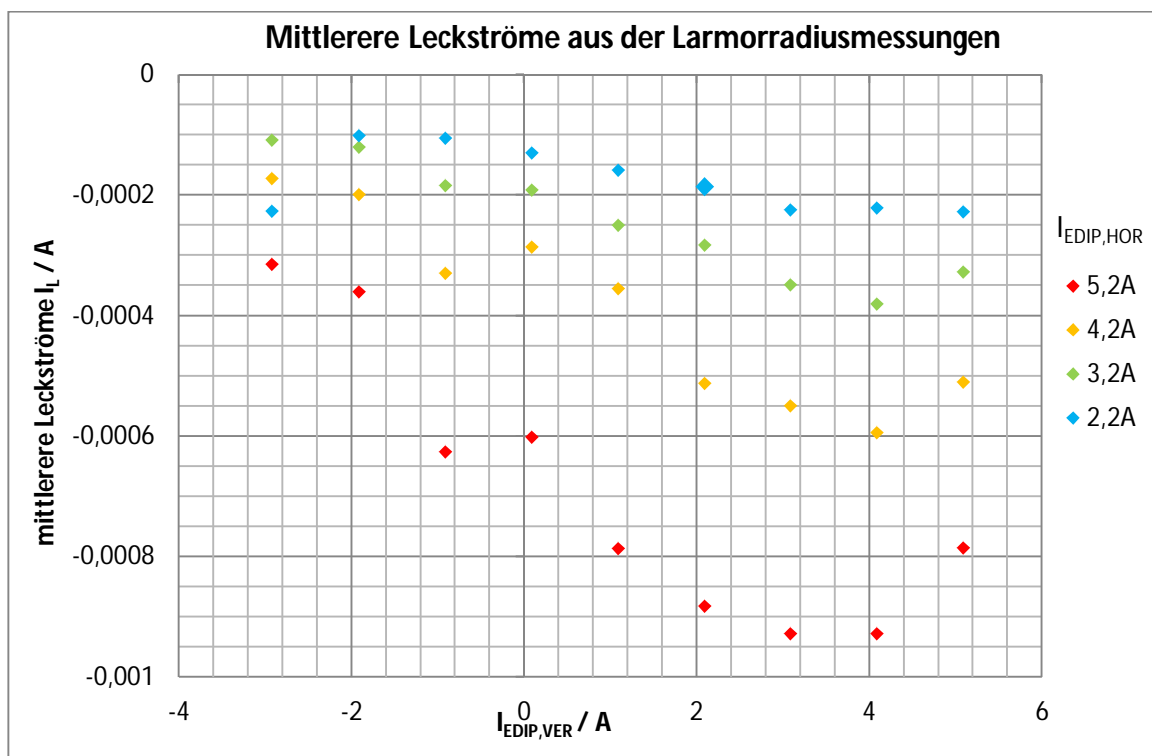


Abb. B.16: Mittlerer Leckstrom ausgewählter Messreihen. Eine sichtbare Abhängigkeit des Leckstromes über Ströme der EDIP-Korrekturmagneten liegt vor. Sie korrelieren jedoch nicht mit der beobachteten Auffälligkeit aus Abb. 4.2.

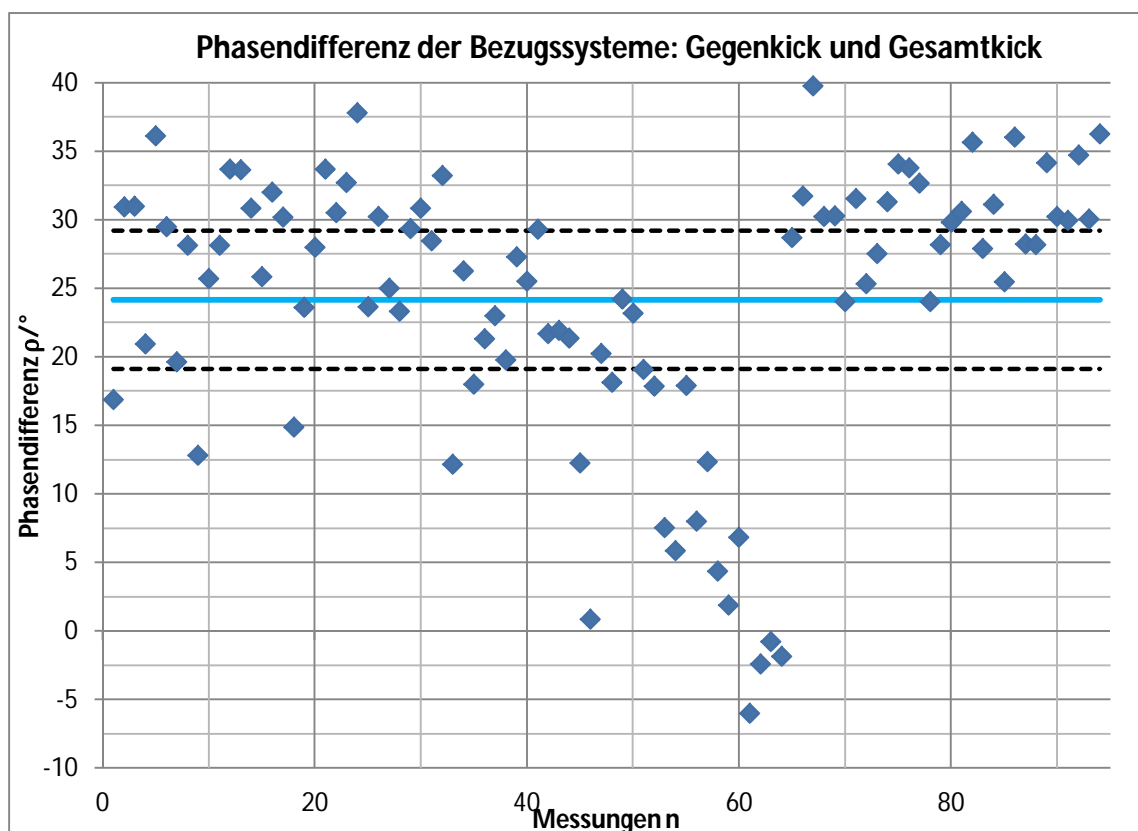


Abb. B.17: Phasendifferenz zwischen dem Gegenkick und dem gemessenen Restkick über alle Messreihen. Blaue Gerade repräsentiert Mittelwert bei 24,5°. Bereich zwischen den schwarzen Geraden entspricht der Standardabweichung mit 10,1°.

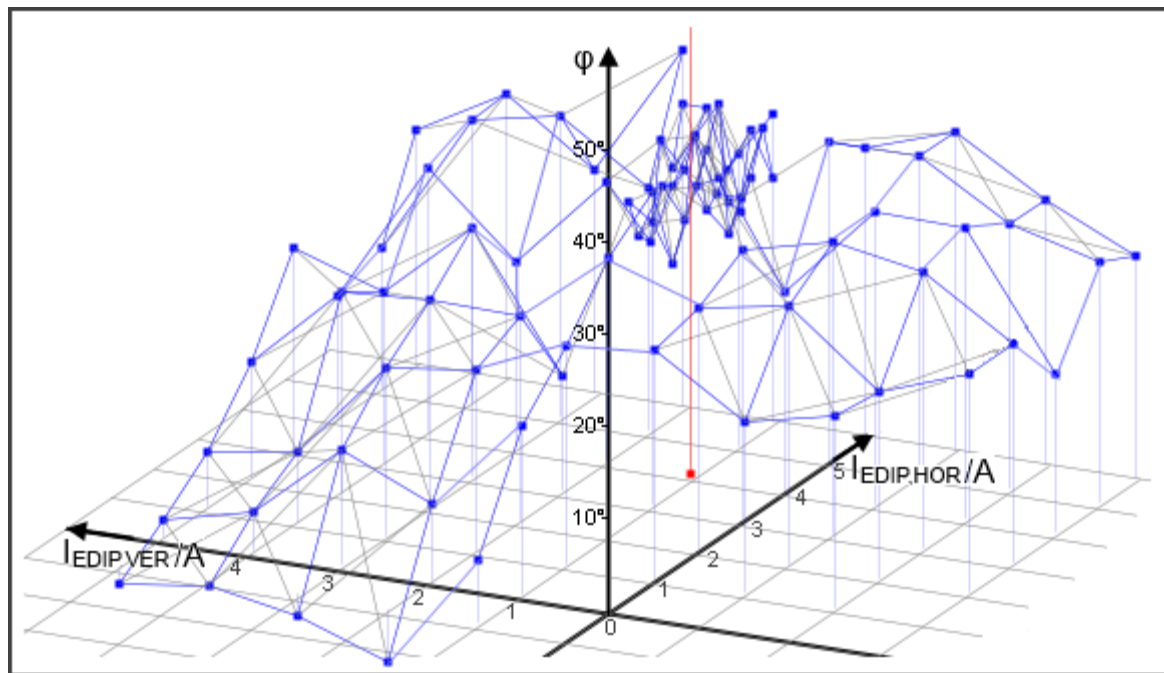


Abb. B.18: Phasendifferenzen zwischen dem Gegenkick und dem gemessenen Restkick über das EDIP-Feld. Als konstant angenommene Phase zwischen den Bezugssystemen der EDIP-Korrekturmagneten und des gemessenen Kicks ändert sich mit starken Abweichungen von der idealen EDIP-Kombination.

Anhang C

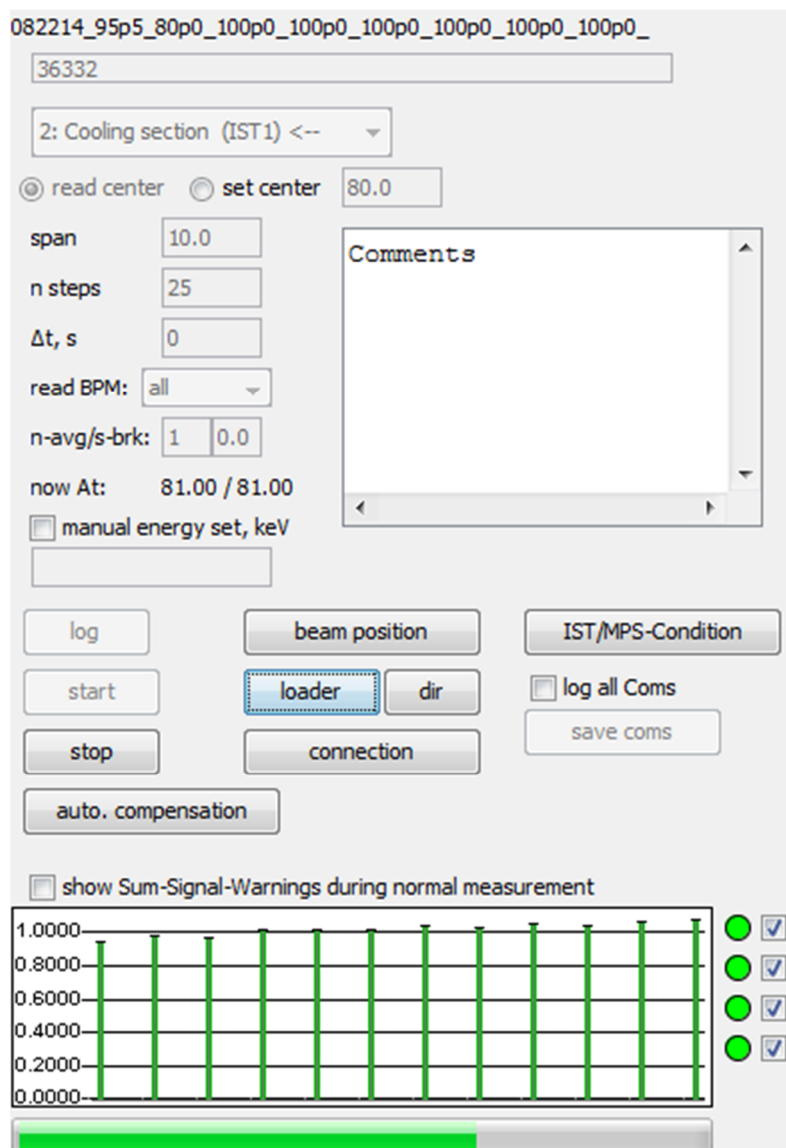


Abb. C.1: Hauptfenster des Programms „Larmorkompensation“. Das Bild zeigt das Hauptfenster der GUI. Parameter für die Larmorradiusmessung werden hier gesetzt. Die manuelle Larmorradiusmessung kann ebenfalls hier gestartet werden. Entsprechend betitelte Knöpfe öffnen weitere Fenster. Erläuterungen folgen in den kommenden Darstellungen. Unten kann das aktuelle Summensignal der BPM überwacht werden, es ist proportional zum Strahlstrom.

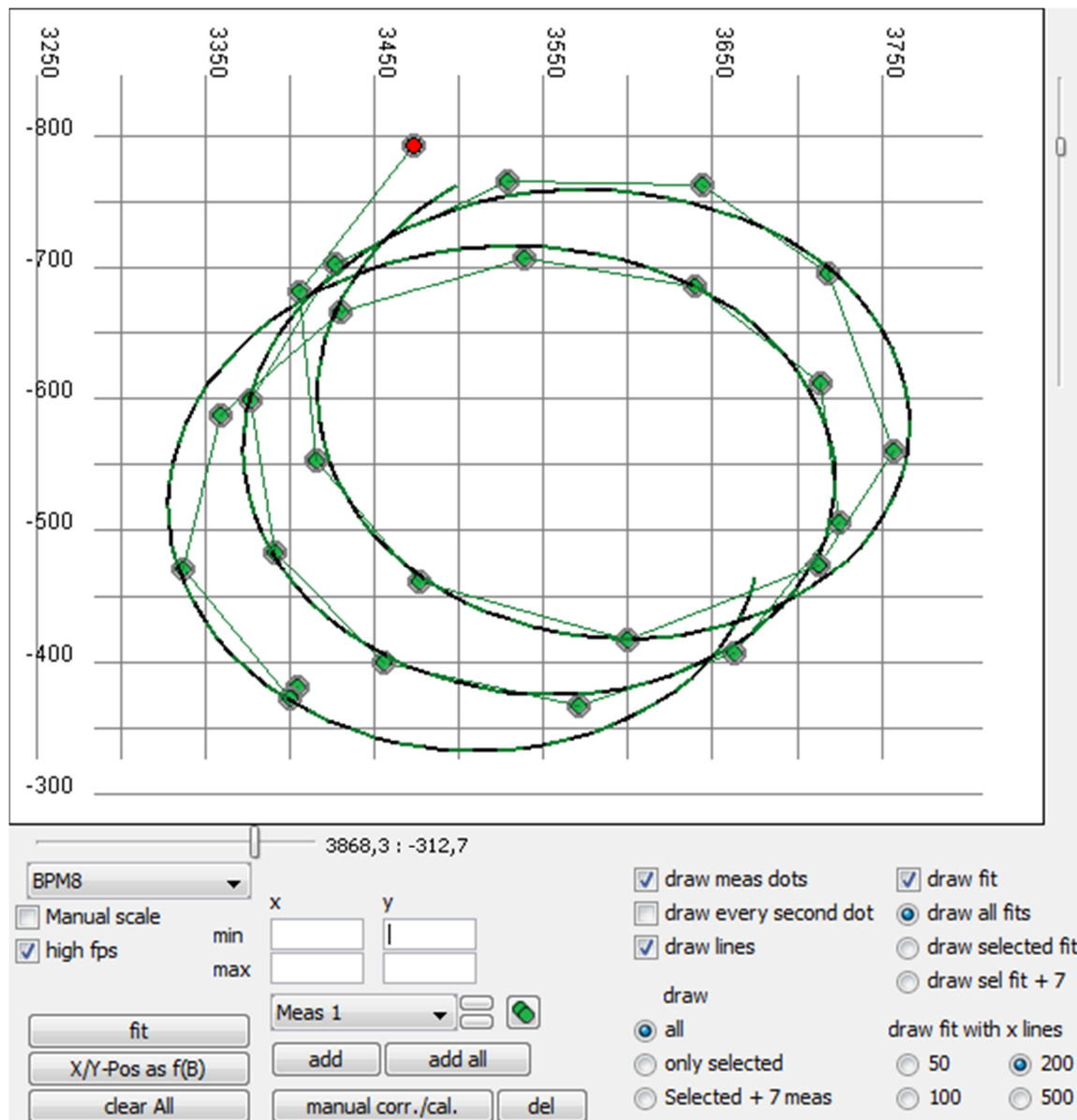


Abb. C.2: Fenster des Strahlpositionsverlaufs mit Messdaten und Fit. Das Bild zeigt Messdaten der Larmorradiusmessung. Eine grobe quantitative Bestimmung des Radius ist durch die Darstellung möglich. Bis zu 84 Messreihen können dargestellt werden. Verschiedene Darstellungen der Messdaten sind möglich. Ergebnisse des Fits können der Berechnung der idealen EDIP-Kombination zugeführt werden.

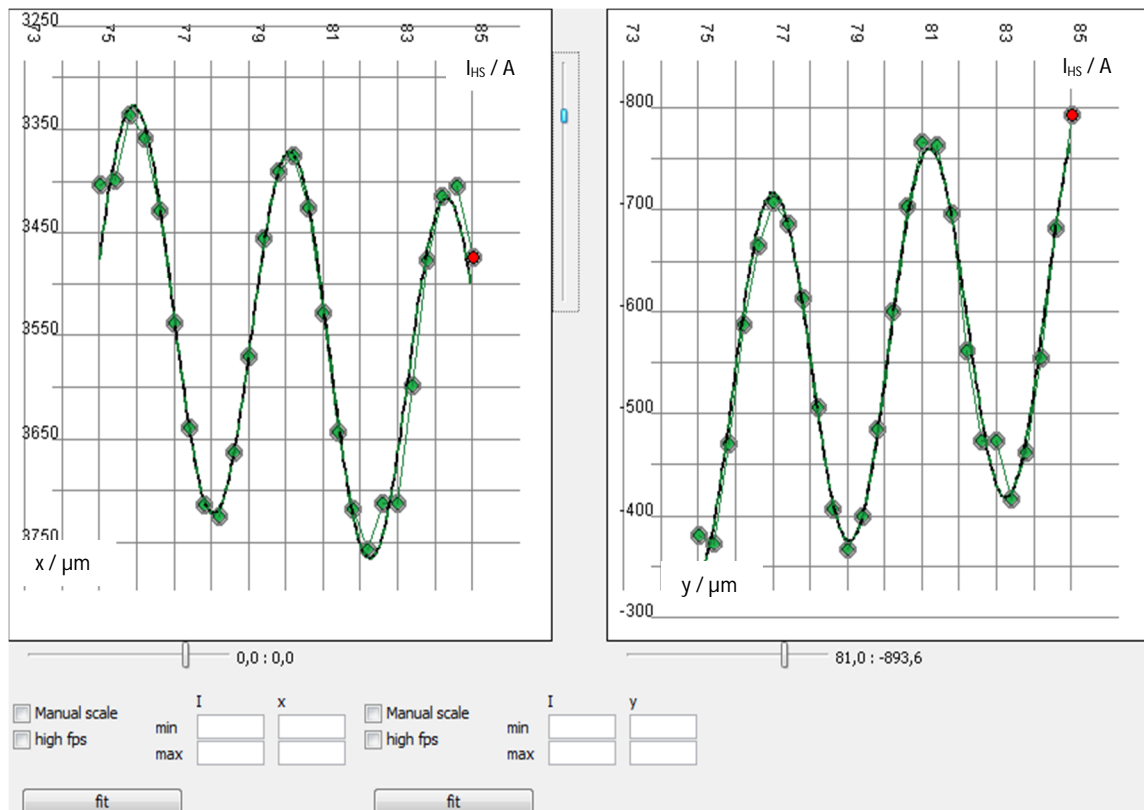


Abb. C.3: Fenster der einzelnen Strahlpositionskoordinaten über den veränderten Hauptsolenoidstrom. Das Bild zeigt Messdaten der Larmorradiusmessung. Es werden die X- und die Y-Koordinate der gemessenen Strahlposition über den veränderten Hauptsolenoidstrom dargestellt. Amplitude der Schwingung ist der Larmorradius.

>>>

EDIPHOR1: 4,201	ax: 6619.701	ay: -348.3326 ⁽⁰⁾
EDIPVER1: -1,914	bx: -0.20244183	by: -8.709506
	cx: 45.21882	cy: -221.67757
	dx: -221.88011	dy: -54.816864
Radius: 227,4		
EDIPHOR1: 4,202	ax: 7387.8774	ay: -1184.8815 ⁽¹⁾
EDIPVER1: -2,916	bx: -0.5069091	by: -7.0686736
	cx: 134.12714	cy: -269.77396
	dx: -261.76715	dy: -145.11804
Radius: 300,2		
EDIPHOR1: 4,201	ax: 5679.3896	ay: 400.30215 ⁽²⁾
EDIPVER1: -0,914	bx: 1.9530936	by: -9.419515
	cx: 23.192879	cy: -145.27821
	dx: -141.55447	dy: -30.645084
Radius: 146,0		
EDIPHOR1: 5,205	ax: 7839.0024	ay: 448.75052 ⁽³⁾
EDIPVER1: -1,914	bx: -5.496806	by: -13.047172
	cx: 118.40616	cy: -192.3903
	dx: -185.17592	dy: -139.5349
Radius: 228,7		
EDIPHOR1: 3,199	ax: 5786.6655	ay: -1143.8468 ⁽⁴⁾
EDIPVER1: -1,917	bx: 0.63010556	by: -4.554182
	cx: -17.282232	cy: -231.11461
	dx: -239.47864	dy: 13.092048
Radius: 235,8		

linear approx (3)

linear (min 3)

quadratic (least 4)

bi-quadratic (least 5)

rec. EDIP_Hor: 5.5773

rec. EDIP_Ver: 1.0162

dCHor: 71.944705

dCVer: -56.303908

dSHor: 23.125201

dSVer: 61.130426

EDIP HOR-1

EDIP VER-1

Abb. C.4: Fenster zur Berechnung der idealen EDIP-Kombination. Aufgereihete Blöcke auf der linken Seite fassen Daten der Larmorradiusmessung und die eingestellte EDIP-Kombination zusammen. Es stehen verschiedene Korrekturrechnungen zur Verfügung. Die empfohlene EDIP-Kombination wird als *rec. EDIP_Hor* und *rec. EDIP_Ver* (rec. = Recommendation) angegeben. Zwischenergebnisse der Korrekturrechnung werden zusätzlich eingeblendet. In diesem Fenster lassen sich zusätzlich die EDIP-Korrekturmagnete auslesen und anhand der berechneten Empfehlungen einstellen.

The figure displays four screenshots of a software interface for automated Larmor rotation compensation, organized into four quadrants. Each quadrant shows a different tab: 'preSet', 'strict', 'smart', and 'indiv'.

- Top-left (preSet tab):** Contains fields for EDIP-Hor min (-5), EDIP-Hor max (5), EDIP-Ver min (-5), EDIP-Ver max (5), EDIP-Hor start-val (0), EDIP-Ver start-val (0), a checkbox for 'Start at current EDIP set', a field for 'read BPM fit number' (8), a checkbox for 'keep values, when limit reached', a field for 'Limit r/μm' (0), a checkbox for 'save data in file', and a 'file name' field (090114_43114). A status bar shows 'Iteration: __ Meas: __ Point: __' and a 'show Log' button.
- Top-right (strict tab):** Features a 'status:' section with 'EDIP-current step' (1), 'meas. per Set.' (5), and 'full iterations' (1). It includes 'Start' and 'stop and reset' buttons. Radio buttons allow selecting 'reset ALL after auto. run', 'keep ALL changes (EDIP Corr)', 'notify when finished', or 'take All meas Data' (checked). Below, radio buttons select the solution type: 'linear solution', 'linear approximation', 'quadratic solution', or 'bi-quadratic solution' (checked).
- Bottom-left (smart tab):** Shows a dropdown for '6 min', a 'better than: 25 μm' field, and 'Start' and 'stop and reset' buttons. A 'status:' section is present, and a checkbox for 'final test by linear calculation' is at the bottom.
- Bottom-right (indiv tab):** Includes a 'status:' section with 'meas. Points' (3) and 'Δ curr. step' (0.25). It has 'Start' and 'stop and reset' buttons. Radio buttons select 'approximation', 'Pattern A/B' (checked), 'Linear Sol.', 'Quadratic Sol.', or 'Bi-Quadr. Sol.'. Buttons for 'add meas unit' and 'remove meas unit' are present. At the bottom, 'save config' and 'load config' buttons are shown with a config ID field (1409572714).

Abb. C.5: Zusammenfassung der Tabs im Fenster zur automatisierten Larmorrotationskompensation. **preSet**: Allgemeine Voreinstellungen für die automatisierte Kompensation. EDIP-Strombegrenzung, EDIP-Startkombination und der auszulesende BPM werden hier gesetzt. Es kann ein Haken gesetzt werden, um den Vorgang vorzeitig nach unterschreiten eines Larmorradius zu beenden. **strict**: Einstellungen für den Korrekturalgorithmus „strict“. *EDIP-current step* ist die Stromschrittweite dieses Vorgangs. *meas. per Set.* ist die Anzahl der zu Messpunkte pro Iteration, also jeweilige Einstellung der EDIP-Kombination und dazugehörige Larmorradiusmessung. Die Art der stetig verwendeten Korrekturrechnung wird hier gewählt. **smart**: Einstellungen für den Algorithmus „smart“. Hier wird nur die Zeit gewählt, die maximal für den Kompensationsvorgang investiert werden soll. Schätzungen der mindestens erreichten Larmorradien werden zusätzlich angegeben. „smart“ verwendet nur die Korrekturrechnungen nach dem quadratischen und dem bi-quadratischen Modell. Ein letzter Vergleich mit dem linearen Modell am Ende des Vorgangs ist durch setzen des entsprechenden Hakens möglich. **indiv**: Unter diesem Reiter lassen sich beliebig kombinierte Abläufe für den Kompensationsvorgang einstellen, speichern und laden. Eine einstellbare Iteration wird als *meas. unit* bezeichnet. Pattern A/B sind verschiedene Verteilungen der EDIP-Kombinationen um den Bezugspunkt. Sie werden in der folgenden Darstellung behandelt. Die Menge der Messpunkte und Stromschrittweite wird hier ebenfalls eingestellt.

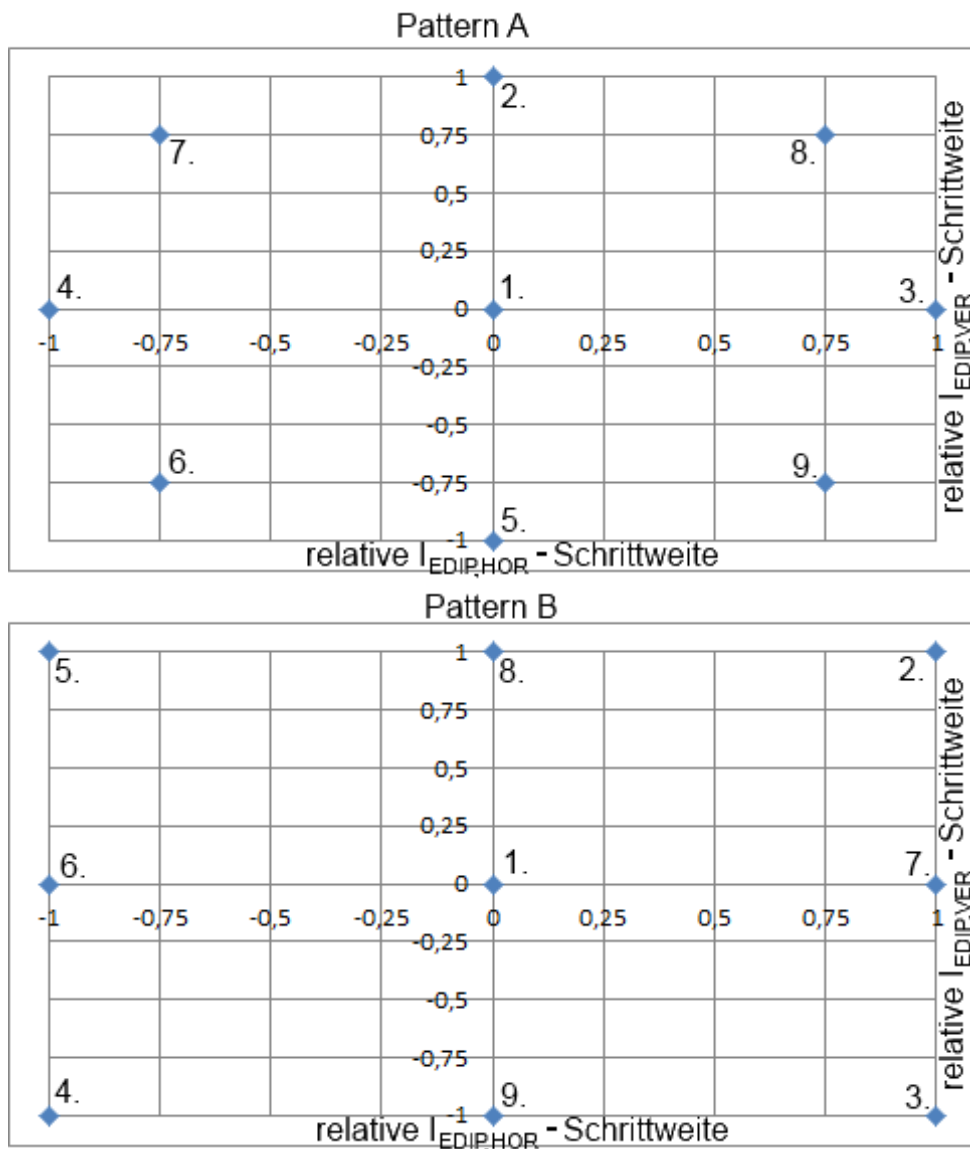


Abb. C.6: Reihenfolge der EDIP-Kombinationen in den Variationen Pattern A und B aus den Algorithmen „smart“ und „indiv“. Das Bild zeigt die Reihenfolge der eingestellten EDIP-Kombinationen einer Iteration. Die Unterschiede in A und B sollen bei ähnlichen EDIP-Bezugspunkten eine größere Fläche der EDIP-Ströme abdecken. Je nach gewählter EDIP-Stromschrittweite wird die relative Schrittweite aus der Darstellung mit der festen angegebenen Schrittweite multipliziert und relativ zum Bezugspunkt eingestellt.

